

小电流接地故障 选线与定位技术

庞清乐 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书在分析小电流接地故障稳态和暂态特性的基础上,系统地介绍了各种故障选线和定位方法,尤其是基于智能算法的小电流接地故障选线和定位方法。主要内容包括基于故障暂态特征信息的智能选线方法、基于故障暂态和稳态特征信息的智能融合选线方法和基于暂态特征信息的小电流接地故障定位方法。其中,以基于智能算法的选线和定位方法为主,介绍了基于粗糙集信号增强的小波包选线方法、基于粗糙集的融合选线方法、基于神经网络的融合选线方法、基于粗糙集预处理的神经网络融合选线方法、基于复合导纳的小电流接地故障定位方法和基于 Multi-Agent 的智能配电网的故障定位方法等作者的创新性研究成果。

本书可作为从事小电流接地故障选线和定位技术研究和应用的科技人员的参考书,也可作为高等学校研究生学习继电保护、电力系统运行与控制 and 智能配电网的教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

小电流接地故障选线与定位技术 / 庞清乐著. —北京: 电子工业出版社, 2010.8

ISBN 978-7-121-11529-5

I. ①小… II. ①庞… III. ①小电流接地—故障诊断 ②小电流接地—故障定位 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 151138 号

策划编辑: 董亚峰

责任编辑: 夏平飞

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 850×1 168 1/32 印张: 7 字数: 179 千字

印 次: 2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 2 000 册 定价: 28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

序 言

自愈是实现智能电网安全可靠运行的主要功能之一，配电网故障的快速、可靠检测是实现自愈功能的基础。配电网发生单相接地故障的概率很高，由于我国中压配电网大多采用小电流接地方式，一旦发生单相接地故障，很难查找故障线路和故障点，小电流接地故障选线和定位是一个迄今为止并未彻底解决的难题。随着传统电网向智能电网的发展，小电流接地故障自动选线和定位技术变得尤为重要。本书主要从两个方面对小电流接地故障进行了探讨和研究。

一方面，在研究近年来各种选线方法的基础上，提出了利用粗糙集理论和神经网络等智能算法实现小电流接地故障选线的方法；另一方面，在研究近年来各种定位方法基础上，提出了复合导纳的小电流接地故障定位方法，并在分析智能配电网功能的基础上对智能配电网故障定位的关键技术进行了初探。

本书共分 9 章。第 1 章为概述，第 2 章为小电流接地系统单相接地故障特征分析，第 3 章至第 6 章给出了基于智能算法小电流接地故障选线方法，第 3 章为基于故障暂态特征信息的智能选线研究，第 4 章为基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线研究，第 5 章为小电流接地故障选线方法的仿真与现场验证，第 6 章讨论了小电流接地故障选线装置设计，第 7 章至第 9 章给出小电流接地故障定位方法，第 7 章为基于暂态特征信息的小电流接地故障定位方法研究，第 8 章为小电流接地故障定位方法的仿真与试验验证，第 9 章主要讨论了智能配电网故障定位关键技术初探。

本书的研究工作得到国家自然科学基金（50777040，60970105）、中国博士后科学基金（20090461204）、山东省自然科

学基金（Z2006F05，Y2007G26）、山东省博士后创新项目专项资金（200903066）、山东省高等学校科技计划（J09LG09）和烟台市科技发展计划（2008159）等项目的资助。

参加研究工作的还有杨福刚博士、孙波博士、高文博士、闫龙博士、初永丽老师、张勇老师、孙静老师、金杰老师等，在此一并致谢！

另外要特别致谢孙同景教授、高厚磊教授、华臻教授、朱智林教授、刘成印教授等，感谢他们为本书写作所提供的帮助和支持。

本书可作为从事小电流接地故障选线定位技术研究和应用的科技人员的参考书，也可作为高等学校研究生学习继电保护的教学参考书。

由于撰写时间和作者水平之限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

作 者
2010.05.10

目 录

第 1 章 配电网概述	1
1.1 配电网概况	1
1.2 小电流接地故障选线现状及评价	3
1.2.1 被动式选线方法	4
1.2.2 主动式选线方法	9
1.3 小电流接地故障定位现状及评价	10
1.3.1 被动式定位方法	10
1.3.2 主动式定位方法	14
1.4 小电流接地故障选线存在的问题	16
1.5 小电流接地故障定位存在的问题	17
1.6 人工智能算法在电力系统中的应用	20
1.7 本书内容摘要	22
1.7.1 本书研究的主要工作概述	22
1.7.2 本书的章节安排	25
第 2 章 小电流接地系统单相接地故障特征分析	27
2.1 小电流接地系统的中性点接地方式	27
2.1.1 中性点不接地方式	28
2.1.2 中性点经消弧线圈接地方式	28
2.2 小电流接地系统单相接地故障的基波稳态特征分析	29
2.2.1 中性点不接地系统单相接地故障的基波稳态 特征分析	30
2.2.2 消弧线圈接地系统单相接地故障的基波稳态 特征分析	33



2.3	小电流接地系统单相接地故障的暂态特征分析	37
2.4	小电流接地系统单相接地故障的谐波特征分析	41
2.5	小电流接地系统的模量分析	43
2.5.1	基于线路分布参数的高精度复合模网	43
2.5.2	基于 π 型电路的故障简化模型及特点	44
2.5.3	小电流接地故障频域特征分析	51
2.6	本章小结	57
第3章	基于故障暂态特征信息的智能选线研究	58
3.1	基于小波包分析的故障选线方法分析	58
3.1.1	小波包基本理论	58
3.1.2	基于小波包分析的故障选线方法原理	63
3.1.3	基于小波包分析的故障选线方法存在的问题	66
3.2	基于粗糙集的信号增强理论	69
3.2.1	暂态零序电流信号的增强	69
3.2.2	粗糙集基本理论	70
3.2.3	基于粗糙集的信号增强信息系统	74
3.3	基于粗糙集信号增强的智能选线实现	75
3.3.1	基于粗糙集的信号增强	75
3.3.2	故障选线实现	78
3.4	本章小结	78
第4章	基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线研究	80
4.1	问题的提出	80
4.2	信息融合基本理论	82
4.2.1	信息融合的产生与发展	82
4.2.2	信息融合的功能与层次	83
4.3	信息融合技术在故障选线中的应用	84
4.4	故障测度函数	85



4.4.1	故障测度函数的定义	86
4.4.2	零序电流暂态分量的故障测度函数	86
4.4.3	零序电流有功分量的故障测度函数	88
4.4.4	零序电流五次谐波分量的故障测度函数	90
4.4.5	零序电流基波分量的故障测度函数	92
4.5	基于粗糙集理论的融合选线方法	93
4.5.1	基于粗糙集理论的融合选线原理	93
4.5.2	基于粗糙集理论的融合选线方法实现	95
4.6	基于神经网络的融合选线方法	98
4.6.1	神经网络基本理论	98
4.6.2	基于神经网络的融合选线方法	102
4.7	基于神经网络的融合选线方法改进	105
4.7.1	BP 神经网络的局限性及改进	106
4.7.2	基于粗糙集理论的样本归一化方法	108
4.7.3	基于粗糙集样本归一化的神经网络融合选线	112
4.8	本章小结	115
第 5 章	小电流接地故障选线方法的仿真与现场验证	116
5.1	仿真模型及参数	116
5.2	基于故障暂态特征信息的智能选线方法验证	117
5.3	基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线方法验证	133
5.3.1	基于粗糙集理论的融合选线方法验证	133
5.3.2	基于神经网络的融合选线方法验证	138
5.4	本章小结	141
第 6 章	小电流接地故障选线装置设计	142
6.1	小电流接地故障选线装置的总体结构	142
6.2	硬件设计	143
6.2.1	数据采集单元	143



6.2.2	数据存储单元	144
6.2.3	DSP 系统	146
6.2.4	FPGA 系统	146
6.2.5	通信端口	146
6.3	软件设计	147
6.4	本章小结	149
第 7 章 基于暂态特征信息的小电流接地故障定位方法研究		150
7.1	暂态 0 模电流特征分析	150
7.1.1	故障点同侧暂态 0 模电流特征分析	150
7.1.2	故障点两侧暂态 0 模电流特征分析	151
7.2	基于复合导纳的小电流接地故障定位方法	153
7.2.1	单一频率 0 模导纳及其不足	153
7.2.2	特征频段内 0 模复合导纳	155
7.2.3	0 模复合导纳应用于故障定位的可行性分析	157
7.2.4	复合导纳法故障定位原理	158
7.2.5	0 模复合导纳法特点	158
7.3	定位方法性能比较	159
7.4	本章小结	162
第 8 章 小电流接地故障定位方法的仿真与试验验证		163
8.1	仿真验证	163
8.2	试验验证	165
8.2.1	试验平台介绍	165
8.2.2	试验验证	166
8.3	本章小结	167



第 9 章 智能配电网故障定位关键技术初探	168
9.1 智能电网概述	168
9.2 智能配电网模型	172
9.3 智能终端单元模型	173
9.4 基于 Multi-Agent 的智能配电网的故障定位技术	175
9.4.1 面向智能配电网的 MAS 结构	175
9.4.2 适用于智能配电网的故障区段定位技术	175
9.4.3 适用于智能配电网的网络重构方法	176
9.4.4 适用于智能配电网的故障诊断方法	177
9.4.5 智能配电网分布式控制方法	177
9.5 智能配电网的通信网络	177
9.6 智能终端单元 ITU 的硬件和软件设计	178
9.7 本章小结	179
附录 现场数据	180
附录 1 竹园站 2004 年 4 月 16 日发生单相接地故障的 部分数据	180
附录 2 竹园站 2004 年 12 月 18 日发生单相接地故障的 部分数据	182
附录 3 清濛变 2005 年 5 月 18 日发生单相接地故障的 部分数据	184
附录 4 清濛变 2005 年 9 月 30 日发生单相接地故障的 部分数据	186
附录 5 潮湖变 2005 年 9 月 30 日发生单相接地故障的 部分数据	188
参考文献	190

第 1 章 配电网概述

国内外中压配电网中性点广泛采用小电流接地方式，以避免发生单相接地故障时跳闸造成供电中断。对于小电流接地故障，由于故障电流微弱、电弧不稳定和随机因素影响等原因，接地故障选线和定位比较困难，一直缺乏可靠的故障选线方法和高准确度的小电流接地故障选线和定位装置，至今许多变电站仍然使用人工拉路方法查找故障线路。随着人们对配电网自动化水平要求的提高，小电流接地故障自动选线和定位问题更加突出，迫切需从根本予以解决。

本章重点论述了小电流接地故障选线和定位技术现状及评价，并指出了小电流接地故障选线和定位技术存在的问题。

1.1 配电网概况

电力系统中性点接地方式可划分为两大类：大电流接地方式（中性点有效接地方式）和小电流接地方式（中性点非有效接地方式）。在大电流接地方式中，主要有中性点直接接地和中性点经低电阻、低电抗或中电阻接地；小电流接地方式主要有中性点经消弧线圈接地、中性点不接地和中性点经高电阻接地等。

世界各国以及各地区配电网中性点接地方式都不尽相同，主要是根据自己的运行经验和传统做法来确定的。美国中压电网以大电流接地方式为主，在 22~70kV 电网中，中性点直接接地方式占 72%。英国电网采用中性点经低电阻接地方式，而对 33kV 以下由架空线路组成的配电网，中性点逐步由直接接地改为消弧线圈接地；电缆组成的配电网，仍采用中性点经低电阻接地方式。日



本东京电力公司 66kV 配电网采用中性点经电阻接地或消弧线圈接地；6.6kV 电网采用不接地方式。法国电力公司（EDF）在 1990 年前后开始对中压电网中性点接地方式进行改造，将运行了 30 多年的大电流接地方式全部改为谐振接地方式。芬兰全国 10kV、20kV 中压电网都采用小电流接地方式，中性点不接地方式和中性点经消弧线圈接地方式各占 80%和 20%。德国、前苏联等国家也多采用消弧线圈接地或不接地方式。

我国 6~66kV 配电网多数为小电流接地方式，其中 66kV 和 35kV 电网主要采用中性点经消弧线圈接地方式；6~10kV 电网部分采用中性点不接地方式，部分采用中性点经消弧线圈接地方式。个别地区如上海、北京、广州等城市电网采用低电阻接地方式。就小电流接地方式的优越性和世界各国所采用的中性点接地方式以及发展趋势来看，中性点采用小电流接地方式仍是一种典型的、有竞争力的接地方式，不会被大电流接地方式取代。在中国，至少在较长的一段时间内，小电流接地方式仍将占主要地位。小电流接地系统使配电网结构复杂，故障选线与定位成为一个公认的难题；随着传统电力网向智能电网的转变，实现智能电网的自愈功能所需的故障快速、可靠地检测和定位极为重要，因此研究小电流接地系统的故障选线和定位技术具有重要而深远的意义。

小电流接地系统的故障绝大多数是单相对地短路故障。小电流接地系统在发生单相接地故障时，由于大地与中性点之间没有直接的电器连接或串接了电抗器，因此短路电流很小，保护装置不需要立刻动作跳闸，从而提高了系统运行的可靠性。尤其在瞬时故障条件下，短路点可以自行灭弧、恢复绝缘，不需要运行人员采取什么措施，这对于减少用户短时停电次数具有积极的意义。但是，小电流接地系统在发生单相接地故障时，非故障相对地电压升高，在发生间歇性弧光接地时，能够引起弧光过电压，系统绝缘受到威胁，容易扩大为相间短路。因此应尽快找到故障线路和故障地点，排除故障。为了确定故障线路，传统的方法是通过



检测母线上零序电压的数值来判断是否发生单相接地故障，若发生接地故障，则采用人工逐条线路拉闸的方法判断哪条线路出现故障。当故障线路被断开时，接地故障指示消失，这样就可以确定故障线路。然后，通过人工巡检方法查找故障地点。人工拉路的方法使正常线路也会瞬间停电；若自动重合闸动作不成功，停电时间将延长；拉路还会对电网形成冲击，容易产生操作过电压和谐振过电压，可能引起断路器或 PT 损坏；对于无人值班变电站，需远方遥控操作，更增加了事故的危险性和设备的负担。

综上所述，小电流接地系统单相接地故障选线与定位技术将对提高供电可靠性、提高供电部门和用户的经济效益和维护电网设备，具有重要的意义。尽管每年都有新的选线和定位装置投入运行，且新的选线和定位技术也层出不穷，但是，小电流接地系统故障选线与定位技术是多年来一直未能很好解决的一个难题，在实际应用中还存在不少问题，现有的小电流接地故障选线和定位装置的准确度依然很低，很多供电部门仍在使用拉路法确定故障线路，采用人工巡检方法进行故障定位。随着人们对配电网自动化水平要求的提高，小电流接地故障自动选线和定位问题更加突出，迫切需要从根本上予以解决。因此研究自动选线和定位技术并研制相应的装置，具有很强的实用价值，市场需求也是非常广泛的。

1.2 小电流接地故障选线现状及评价

20 世纪 80 年代以来，随着微机技术的不断成熟，多种微机在线自动选线装置被研制开发出来，目前国内生产选线装置的厂家达到几十家。虽然各厂家都宣称自己的装置选线准确，但从用户方面返回的意见却是选线效果普遍不好。某地区供电局对自动选线装置的使用情况进行过统计，发现该局共安装选线装置 170 台，



因选线效果极差退出运行 146 台，退出率达 86%。在其他地区调查的情况也基本类似，这说明选线技术目前并不成熟。

小电流接地故障选线的主要任务是选择故障线路。现有故障选线原理，按照利用信号方式不同可分为主动式与被动式。主动式方法需向电网注入信号，而被动式方法则利用接地故障产生的电压、电流信号。被动式又可分为利用故障稳态信息、暂态信息以及同时利用稳态和暂态信息三大类。

1.2.1 被动式选线方法

(1) 基于故障稳态信息的选线方法

1) 零序电流幅值法

利用中性点不接地系统故障线路工频零序电流幅值比健全线路大的特点，选择工频零序电流幅值超越一预设门槛的线路或者选择零序电流幅值最大的线路为故障线路。也可将故障后线路的零序电流与自身对地电容电流作幅值比较，选择有变化的线路为故障线路。

这种选线方法检测灵敏度较低，除了不能排除电流互感器 (TA) 不平衡影响和不能检测母线接地故障外，还受系统运行方式、线路长短和过渡电阻大小等许多因素的影响，从而导致误选、多选、漏选。从整定方式上看，这种整定方式可能导致死区，不能满足系统多变的情况。

2) 零序电流比相法

利用中性点不接地系统故障线路工频零序电流方向与健全线路相反的特点，选择与其他线路电流相位相反的线路为故障线路。

这种选线方法在经大电阻接地或线路较短时，零序电压、零序电流均较小，容易产生“时钟效应”使相位判断困难，而受电流互感器不平衡电流、受过渡电阻大小、继电器工作死区及系统运行方式的影响，容易发生误判，并且不能适应谐振接地时完全



补偿、过补偿运行方式，检测可靠性受接地电弧不稳定的影响。

3) 零序电流群体比幅比相法

其原理是先进行零序电流比较，选出几个幅值较大的作为候选，然后在此基础上进行相位比较，如果某条线路方向与其他线路不同，则其为故障线路，如果所有零序电流同相位，则为母线故障。该方法是中性点不接地系统的常用选线方法，被大多数选线装置所采用。

该方法在一定程度上解决了前两种方法存在的问题，但同样不能排除电流互感器不平衡电流及过渡电阻大小的影响。

4) 零序无功功率方向法

利用中性点不接地系统故障线路零序电流相位滞后零序电压 90° 、而健全线路超前 90° 的特点，选择无功功率小于零（流向母线）的线路为故障线路。该方法也是比较传统的方法，在欧洲应用较为广泛。

该方法也是利用了容性电流的幅值与方向，所以从本质上，无功功率法与比幅比相方法如出一辙，两者的优缺点是一致的。

5) 最大 $I\sin\phi$ 或 $\Delta(I\sin\phi)$ 法

利用一中间参考正弦信号，通过检测母线电压确定发生故障后，首先依次检测各出线零序电流落后母线电压的相角关系，由此再把所有线路故障前后的零序电流都投影到故障线路的零序电流 I_{0f} 的理论方向上，然后计算各出线故障前后的投影值之差 ΔI_{0k} ，找出差值最大的 ΔI_{0k} ，即最大的 $\Delta(I\sin\phi)$ 。若 $\Delta I_{0k} > 0$ ，则线路 k 为故障线路，否则为母线故障。

此法的本质是寻求最大无功功率突变变量的代数值，从理论上基本消除了 CT 不平衡的影响，但也有两个缺陷：首先，计算过程中需要取一参考信号，若该信号出现问题，将造成该算法失效；其次，计算过程中需要求出有关向量的相位关系，计算量很大。

方法 1) ~ 5) 共同的特点是只适用于中性点不接地系统，而不适用于中性点经消弧线圈接地系统。为克服此缺点，可使用以



下几种方法。

6) 零序电流有功分量或有功功率法

电网线路、特别是消弧线圈串/并联的非线性电阻将产生一定有功电流且不能被消弧线圈补偿。故障线路零序电流有功分量或有功功率比健全线路大且流向相反，利用该特征可选出故障线路。因为该方法的故障信息同样是不够突出，受 CT 不平衡、线路长短、过渡电阻大小的影响也较大，并且由于三相电容不平衡引起的“虚假有功电流分量”对有功分量算法的影响较大。

7) DESIR 法

故障后从所有出线中的零序电流中提取基波有功分量，计算出故障点残余有功电流，将每一出线零序电流在故障点有功电流垂直轴上进行投影比较，故障馈线零序电流的投影与其他非故障馈线零序电流的投影不仅相位相反，而且数值最大，据此便可检出故障馈线。该方法是有功分量方法的改进，优点是不需要零序电压信号。缺点是对零序电流的精度要求很高，一般 TA 不易满足。

8) 五次谐波法

故障点和线路设备等非线性因素会产生谐波电流，其中以五次谐波分量为主。由于消弧线圈是按基波整定的，消弧线圈对五次谐波的补偿作用仅相当于工频时 $1/25$ 。因此一般条件下故障线路的五次谐波电流比非故障线路的大且方向相反，根据比幅比相法便可以确定故障线路。接地电流中的谐波分量较小（一般小于 10%），不利于检测，且负荷中的五次谐波源、CT 不平衡电流和过渡电阻的大小，都会在一定程度上影响选线结果。

9) 各次谐波综合法

将零序电流 3、5、7 等多次谐波分量求和后再根据五次谐波理论进行选线。虽然能一定程度上克服单次谐波信号小的缺点，却不能从根本上解决问题。



10) 零序导纳法

根据电网正常运行时的零序回路，利用消弧线圈适当的失谐状况和位移电压的相应改变，可计算出每条出线的对地导纳和导纳系数，将其作为相应出线的参考值存储起来。故障时相当于电网附加了一个不对称电源，会引起出线导纳系数的改变。比较每条线路故障前后导纳系数的变化可以确定故障线路。该方法灵敏度较高，已在欧洲国家使用，我国也已引进多套装置。但需要消弧线圈配合使用，不适用不接地或消弧线圈不能自动调谐的系统。

11) 残留增量法

在单相永久接地故障的情况下，如果改变消弧线圈的失谐度（限压电阻的阻值），则只有故障线路中的零序电流（故障点的残余电流）会随之改变。因此，通过对各条出线在失谐度改变前后零序电流的变化进行对比，变化最大的即为故障线路。可消除 TA 等带来测量误差的影响，可重复计算、重复判断。和消弧线圈的自动调节配合使用，对瞬间熄灭电弧和故障选线十分有利。该方法的灵敏度、可靠性也较高。缺点是不适用对不接地和消弧线圈不能自动调节的系统。

12) 负序电流法

负序电流法选择负序电流最大的线路或直接选择负序电流超越一定门槛的线路为故障线路。该方法受系统不对称度和负荷影响较大；负序电流的获取也较为困难。

上述基于稳态信息选线方法的一个共同特点是，当故障点电弧不稳定、特别在间歇性接地故障时，由于没有稳定的稳态信息，受其影响较大。

（2）基于故障暂态信息的选线方法

1) 首半波法

首半波法原理是基于接地故障发生在相电压接近最大值瞬间这一假设，它利用故障线路暂态零序电流和电压初始阶段极性有



一段时间相反而健全线路相同的特点实现选线。可适用于不接地和经消弧线圈接地系统；可检测不稳定接地故障。但极性关系成立的时间很短，且受线路参数、故障初相角、过渡电阻大小等因素影响。

2) PRONY 算法

PRONY 算法对于接地故障电流的分析具有很高的准确性，它是一种用指数项拟合模型的频谱分析的方法。小电流接地系统发生接地故障时，故障电流暂态分量的频率、幅值、阻尼和相位等参数与故障特征有清晰的相关性，利用 PRONY 算法分析高频分量的频率和直流分量的阻尼，从而实现故障定位的方法是有效的，但此算法的计算量较大。

3) 基于小波变换的暂态零序电流比较法

利用合适的小波和小波基对暂态零序电流进行小波变换，根据故障线路上暂态零序电流某分量的幅值包络线高于健全线路、且二者极性相反的关系选择故障线路。

小波选线方法的优点是：第一，该方法对中性点不接地和中性点经消弧线圈接地的电网都适用。第二，该方法特别适用于故障状况复杂、故障波形杂乱的情况，这与稳态变量选线方法形成优势互补。由于小波算法采用的暂态信号受过渡电阻、故障时刻等多种因素影响，暂态信号呈随机性、局部性和非平稳性特点，有可能出现暂态过程不明显的情况，在这种情况下小波算法就要和其他方法联合使用。

(3) 同时利用故障稳态和暂态信息的选线方法

1) 能量法

能量法是对系统故障后的全部过程均以能量的观点来解释。定义线路零序电压与零序电流乘积的积分为能量函数，则故障前所有线路的能量为零，故障后故障线路的能量恒小于零、而健全线路的能量恒大于零，且故障线路能量幅值等于所有健全线路和



消弧线圈之和。该能量函数本质上是瞬时功率（瞬时有功功率和瞬时无功功率之和）的累积，无功分量的积分为交替变化的周期函数，而有功分量的积分呈发散状。由于接地电流中有功分量较小，且积分函数易将一些固定误差累积，因此该方法的实际效果有待观察。

2) 基于信息融合技术的选线方法

小电流接地系统单相接地故障情况复杂，每一种选线技术都有各自的应用条件，不能适用所有的故障情况。所以，利用专家系统、证据理论、神经网络、模糊理论、遗传算法和粗糙集理论的信息融合故障选线方法应运而生。该方法充分利用了各种故障特征，使选线的可靠性大大提高。目前，该方法尚处在研究阶段，尚需做进一步研究。

1.2.2 主动式选线方法

1) 注入单频信号法

利用单相接地时原边被短接、暂时闲置的故障相电压互感器(TV)向接地线路注入一特定电流信号。由于注入信号将沿接地线路经接地点返回，利用信号电流探测器在开关柜后对每一条出线进行探测，探测到注入信号的线路即故障线路。该方法利用处于不工作状态的接地相电压互感器TV注入信号，不增加一次设备且不影响系统运行，但注入信号的强度受电压互感器容量限制，接地电阻较大时线路上分布的电容会对注入的信号分流，给选线和定位带来干扰；如果接地点存在间歇性电弧现象，注入的信号在线路中将不连续且会破坏信号特征，给检测带来困难。

2) 注入变频信号法

通过消弧线圈电压互感器（接地电阻较大时）或故障相电压互感器（接地电阻较小时）发送可变频的恒流信号，测量各条出线阻尼率来选择故障线路。该方法可一定程度上克服注入单频信



号方法在高阻接地时存在的问题，但当接地电阻较小时，信号电流大部分流经故障线路，导致非故障线路上阻尼率误差较大。

1.3 小电流接地故障定位现状及评价

对于小电流接地故障定位，许多学者做了大量研究，按照定位利用的信号方式不同可分为主动式定位方法与被动式定位方法两大类。主动式定位方法是在线路故障发生后向系统注入特定信号，根据相应的定位原理确定故障位置；被动式定位方法则是利用线路故障前后线路本身电压、电流信号特征的变化设计定位判据，确定故障位置。

1.3.1 被动式定位方法

（1）阻抗法

阻抗法故障测距原理是假定线路参数单一，在不同故障类型条件下计算出的故障回路阻抗或电抗与测量点到故障点的距离成正比，从而通过计算故障时测量点的阻抗或电抗值得除以线路的单位阻抗或电抗值得到测量点到故障点的距离。

阻抗法具有投资少的优点，但受路径阻抗、负荷电流、系统运行方式等因素的影响，故障测距误差较大。对于带有多分支的配电线路，阻抗法无法排除伪故障点，它只适合于结构比较简单的线路。

（2）行波法

行波法是利用线路故障时产生的向故障点两侧传播的暂态行波进行故障测距。现代行波测距原理主要包括单端测距原理和双端测距原理两种。单端测距原理是利用线路故障时在测量端感受到的第 1 个正向电压或电流行波浪涌与其在故障点反射波之间的



时延计算出测量点到故障点之间的距离。双端测距原理是利用线路故障产生的初始电压或电流行波浪涌到达线路两端测量点时的绝对时间之差值计算出故障点到两端测量点之间的距离。

单端行波故障测距原理具有很高的准确性，但可靠性难以保证，有时很难准确识别出故障点反射波；双端行波故障测距原理具有很高的可靠性，并且能够单独使用，是一种主要的测距原理。但它需要在线路两端装设检测装置和两端时间的精确同步，并且需要两端装置交换数据的数据通道，成本相对较高。

行波法在输电线路中已经获得成功应用，配电线路结构复杂，分支众多，线路距离短，在配网中应用行波测距关键要解决故障波头的识别及混合线路波阻抗变化的问题，同时考虑其经济成本。行波法适用于分支少、距离长的高压输电线路及中压配电线路，不适用于线路短、分支众多、结构复杂的配电线路。

（3）稳态零序电流比较法

对于不接地系统，故障点上游检测点的零序电流为所有健全线路对地分布电容电流与该检测点到母线区段（包括期间的分支线）的分布电容电流之和，而下游检测点的零序电流等于该检测点到线路末端（包括期间的分支线）的对地分布电容电流。对于一般拥有多条出线的配电系统，故障点上游紧邻检测点的零序电流幅值最大且故障点两侧零序电流幅值存在较大差距。而无论故障点上游或是下游的健全区段，其两侧零序电流差仅为本区段对地分布电容电流，幅值接近。因此，可选择工频零序电流幅值最大检测点的下游区段为故障区段。考虑到电流互感器（TA）等带来的测量误差，可在零序电流幅值最大的几个检测点中选择两侧幅值差最大的区段为故障区段。

该方法简单实现，可利用开关自带的三相电流互感器合成零序电流信号，不需要额外投资。但是该方法仅适用不接地系统，对于城区普遍存在的经消弧线圈接地系统则不再适用。



(4) 稳态零序无功功率方向法

鉴于中性点不接地系统零序网络主要由线路对地电容构成，线路中零序功率主要为容性无功功率，顺着母线至线路负荷终端的方向查找故障位置，根据故障分支的零序功率方向与查找方向逆向，非故障分支零序功率方向与查找方向顺向，即故障分支零序电流滞后零序电压 90° ，非故障分支零序电流超前零序电压 90° 的特点确定故障分支。根据故障点前零序功率方向与查找方向逆向，故障点后零序功率方向与查找方向顺向确定故障点位置。零序电压采自中性点电压，零序电流通过空间磁场获得。利用全球定位系统（GPS）实现零序电压和零序电流的相角同步测量，利用通用分组无线业务（GPRS）来实现数据的无线通信。本方法优势是不受线路分布电容的影响，但是只适用于中性点不接地系统，不适用于中性点经消弧线圈接地系统，且装置复杂，每个检测点处必须安装 GPS 以实现同步测量，安装 GPRS 以实现零序电压数据的远传，成本高。

(5) 五次谐波法

根据故障点前向支路、后向支路和非故障支路的零序电压、零序电流的特点，提出通过测量空间电场和磁场的五次谐波并分析其幅值和相位关系判断小电流接地系统单相接地故障点。但由于五次谐波幅值较小，不易检测，如何提高检测装置的灵敏度和抗干扰能力，是其推广应用的关键。

(6) 暂态零序电流比较法

故障产生的暂态电流幅值大于工频分量，且消弧线圈对高频信号的补偿作用明显下降。在经消弧线圈接地系统中，可利用各检测点暂态零序电流在一特定频段内分量的幅值和极性差异确定故障区段。其定位原理和判据与不接地系统中基于工频零序电流比较的方法完全相同。



由于各检测点终端设备 FTU (Feeder Terminal Unit) 或其他故障检测装置无法实现精确时间同步, 基于暂态零序电流幅值和极性比较的原理无法应用。

(7) 相关法

相关法是一种通过判断相邻检测点的暂态 0 模电流相关性确定故障区段的故障定位方法。故障点同侧的暂态 0 模电流初始极性相同, 波形变化一致, 具备相似性。故障点异侧的暂态 0 模电流初始极性相反, 波形差异很大, 不具备相似性。可通过公式 (1-1) 求取相邻检测点的暂态 0 模电流的相关系数。

$$\rho = \sum_{n=1}^N i_{01}(n)i_{02}(n) / [\sum_{n=1}^N i_{01}^2(n) \sum_{n=1}^N i_{02}^2(n)]^{1/2} \quad (1-1)$$

式中: i_{01} 、 i_{02} 分别为相邻两检测点的暂态零序电流, 采样起始点 $n=1$ 为故障发生时刻, n 为采样序列, N 为数据长度。

相关系数 ρ 反映了两个固定波形 $i_{01}(n)$ 和 $i_{02}(n)$ 的相似程度。当两个信号波形完全相似 (成比例关系) 时, ρ 取得最大值 1; 完全不相似 (无关) 时, 则为 0。

该方法仅需暂态 0 模电流信号, 避免了安装电压互感器带来的问题, 且检测灵敏度较高, 不受中性点运行方式的影响。但是该方法对所应用系统的通信网络要求较高, 通信数据量大。

(8) 暂态无功功率方向法

零序网络中健全线路和故障线路故障点至负荷区段上各检测点处, 从检测点看进去, 可看做末端开路的传输线, 输入阻抗的频率特性在第一次串联谐振之前成容性。故障点至母线区段上各检测点, 由于所有健全线路可看做此段线路的负荷, 在第一次串联谐振之前成容性, 从检测点向母线方向看进去, 输入阻抗频率特性在第一次串联谐振之前也为容性。对于消弧线圈接地系统, 暂态信号频率大于三次谐波 (150Hz) 时, 可以忽略消弧线圈的影



响，即从三次谐波到第一次串联谐振频率之间输入阻抗仍然呈现容性。选取所有线路容性的低频段为 SFB 频段，在该频段内，所有线路可等效为电容。

定义暂态无功功率 Q_0 为电压信号的 Hilbert 变换与电流信号在暂态时段内的平均功率，即

$$Q_0 = -\frac{1}{T} \int_0^T i_0(t) \hat{u}_0(t) dt = -\frac{1}{\pi T} \int_0^T i_0(t) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u_0(\tau)}{t-\tau} d\tau dt \quad (1-2)$$

式中： $\hat{u}_0(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u_0(\tau)}{t-\tau} d\tau$ 为电压 u_0 的 Hilbert 变换。

在 0 模网络中，在 SFB 频段内，故障线路故障点至负荷段检测点检测到的功率为检测点到负荷段等效电容吸收的无功功率，故障点至母线段检测点检测到的功率主要为所有健全线路等效电容吸收的无功功率。对于故障线路故障点到母线区段上的检测点， $Q_0 < 0$ ；对于故障线路故障点至负荷段检测点， $Q_0 > 0$ 。利用该特征即可确定故障区段。

利用此方法，只需检测点处线路自身的故障暂态电压、电流信息即可判断故障，不需要其他检测节点的信息，不需要额外注入信号，本方法具有自具性。但是该方法需要获得各检测点的零序电压。在每个检测点安装零序 TV 不仅增加投资，TV 产生的接地点也易成为系统的安全隐患。因此，该方法一直未获得实际应用。

1.3.2 主动式定位方法

(1) “S”注入法

“S”注入法是在故障发生后，利用信号注入装置通过母线处安装的电压互感器向接地线路注入特定频率的电流信号。注入信号会沿着故障线路故障相经接地点注入大地，用信号探测器检测每一条线路，有注入信号流过的线路被选为故障线路。选出故障



线路后，手持探测器沿线查找，利用信号寻迹原理即可确定故障点的位置。

该方法在现场应用中有一定的效果，且不受消弧线圈的影响，不要求线路上装设零序电流互感器。其缺点在于：注入信号的强度受电压互感器容量限制；接地电阻较大时线路上分布电容会对注入的信号分流，给故障定点带来干扰；如果接地点存在间歇性电弧现象，注入的信号在线路中将不连续，给检测带来困难。该方法沿线寻找故障点花费时间较长，有可能在此期间引发系统的第2点接地，造成线路自动跳闸。该方法不能检测瞬时性和间歇性接地故障。

（2）中电阻法

中电阻法是在接地故障发生后，人为在系统中性点投入一中值电阻，在故障线路故障相与系统母线间形成一人为的故障工频电流，故障线路故障点上游可以检测到此故障电流，而故障点下游和非故障线路检测不到此故障电流，通过检测此工频电流就可以实现线路接地故障的定位。

该方法人为增大了接地故障电流，使得接地点容易检测，目前与消弧线圈配合使用，得到了比较理想的效果。但该方法所需的中性点电阻设计困难，所需投资较高，且人为增大了接地电流，增大了系统安全隐患和对通信系统的干扰，也不利于人身安全。该方法也不能检测瞬时性和间歇性接地故障。

（3）交直流综合注入法

由于定位的可靠性与所注入的信号频率成反比，且与接地电阻的大小、故障点后线路长度有关。交直流综合法定义了电阻-长度积，即接地电阻与线路长度的乘积，用该量表示定位的有效范围。当电阻-长度积较小时，采用60Hz交流信号注入法；当实际的电阻-长度积较大时，采用直流信号注入法。故障定位方法与“S”注入法和中电阻法相同。



采用 60Hz 信号注入法相比于前述 220Hz 信号注入法(“S”注入法),其作用范围可以增加 3 倍以上,提高了定位的有效性。直流注入信号在线路中没有衰减,不怕线路有分支,不受故障点接地电阻、线路分布电容的影响。但是直流信号的检测比较麻烦,需要检测人员通过登杆、将具有一定长度绝缘杆的直流检测器挂于线路之上,且所加入的直流信号的电压很高,具有一定的危险性。实际应用中电阻-长度积计算困难。同样,该方法也不能检测瞬时性和间歇性接地故障,故障定位时间长,费时费力。

1.4 小电流接地故障选线存在的问题

尽管已有数十种故障选线方法提出并应用到现场,但由于实际使用效果均不理想,相当多的故障还是依靠人工拉路的方法实现故障线路选择。因此,小电流接地故障可靠选线仍然是一个棘手并急需解决的问题。究其原因,小电流接地故障选线主要存在以下困难和问题。

(1) 信号的故障特征不明显

单相接地时故障稳态电流一般小于 30A,甚至只有几安培。其中有功分量和谐波分量更小,一般不到接地电流的 10%。但是由于配电网结构复杂,对于不同的电网其含量也不同,所以在发生单相接地故障时,故障特征有时明显有时不明显;故障暂态信号虽然幅值比稳态信号大,但是由于其持续时间短,有时很难检测到。所以基于单一故障特征的选线方法很难实现对各种故障情况选线正确率都较高。

(2) 不稳定故障电弧的影响

现场的单相接地故障中,绝大多数为瞬时性接地或间歇性接地,其故障点普遍为电弧接地。即使对于金属性永久接地故障,



其故障的一般发展过程为：间歇性电弧接地→稳定电弧接地→金属性接地。根据实测可知，间歇性电弧接地持续时间可达 $0.2\sim 2\text{s}$ ，频率可达 $300\sim 3000\text{Hz}$ ；稳定电弧接地持续时间可达 $2\sim 10\text{s}$ ；最后故障点被烧熔成金属性接地，即所谓永久性故障接地。因此，弧光接地在单相接地故障中较为普遍。弧光接地故障的发展机理较为复杂，一般的理论认为电弧在接地电流过零时可能熄灭，而在电压接近峰值时可能重燃。弧道电阻也随着电压和电流的变化而发生非线性变化。因此，弧光接地故障大多是不稳定的。

对于弧光接地、特别是间歇性电弧接地，由于故障点不稳定，没有一个稳定的接地电流（包括注入的电流）信号，使得基于稳态信息的检测方法失去了理论基础。虽然有些产品在模拟试验时的效果尚可，但由于模拟试验大多采用人工接地方法，线路导体与地发生金属性接触，与实际运行中的绝缘击穿现象并不完全相同，因此，这些产品在实用中的效果就不如在试验中那么理想。

（3）随机因素的影响

我国配电网运行方式改变频繁，造成变电站出线长度和数量频繁改变，其电容电流和谐波电流亦随之变化。另外，母线电压的高低变化、负荷电流的大小变化、故障点的接地电阻不确定等因素都会造成故障零序电流不稳定。

1.5 小电流接地故障定位存在的问题

（1）部分定位原理不可靠

小电流接地故障时，故障稳态电流微弱，一般小于 20A ，甚至只有几安培。随着消弧线圈的大量使用，故障线路稳态零序电流的幅值与极性不再具备故障特征，基于稳态零序电流的故障检测方法不再有效。



现场的接地故障中，很多为瞬时性接地或间歇性接地故障，其故障点普遍为电弧接地。对于弧光接地、特别是间歇性弧光接地，没有一个稳定的接地电流信号，使得基于稳态信号的检测方法失去了理论基础。

小电流接地故障定位方法中有的利用的信号本身很弱（如五次谐波法）；有的故障判据成立的时间很短（如首半波法），从而导致算法不可靠；有的算法本质上还是使用工频零序电流，不管是使用什么样的分析工具，效果均不佳。近年，国内外学者将许多数学分析工具，如小波分析、粗糙集理论、神经网络、遗传算法、冗余纠错、模糊理论引入到小电流接地保护中，智能数学分析工具的使用可以更准确、可靠、灵敏地提取故障特征，一定程度上提高了保护的准确率和可靠性，但是不能从根本上解决问题，过于依赖数学工具，忽视了故障特征本身的分析。

（2）不同监测点信号不能精确同步

暂态信号已在小电流接地故障选线中成功应用，主要有暂态 0 模电流幅值比较、极性比较、暂态无功功率方向法。在配电自动化系统中，主要是利用线路上安装的馈线终端单元（FTU）检测暂态 0 模电流信号，实现故障定位。配电自动化系统主要利用主站实现 FTU 的时间同步，对时误差至少为几毫秒。在此情况下，暂态信号的幅值、极性比较法或者是利用小波、数学形态学等智能方法对信号进行处理，然后再比较其极性的方法不再有效。相关分析法中，在信号同步的情况下，故障点同侧两相邻检测点的暂态 0 模电流相关系数接近 1，故障点两侧暂态 0 模电流相关系数很小，利用此特征可以确定故障区段。但是若时间不同步，故障点同侧和两侧两相邻检测点的 0 模电流相关系数均很小，此时便无法确定故障区段。



(3) 故障信号获取困难

目前应用于小电流接地系统单相接地故障检测方法和装置，大都需要检测系统的 0 模电压和（或）0 模电流信号。电力系统中普遍采用的提取 0 模电流的方法是在电缆出线的系统中装设零序（0 模）电流互感器，在架空出线系统中装设三相电流互感器，通过三相电流合成 0 模电流信号。零序电压则是通过在母线或线路上安装电磁式电压互感器获得。随着技术的进步，光学互感器有了较大发展，但是离广泛应用还有一定距离。如果沿线每个检测点安装零序（0 模）TV、TA 或三相 TA 来获取 0 模电压和 0 模电流信号，不仅投资巨大，安装不便，需要停电安装，而且还易使系统产生铁磁谐振等安全隐患，不利于大面积推广，也正是因为此原因，有些效果很好的故障检测方法受到限制，至今未能现场应用。

(4) 故障数据不能批量传输

利用瞬时值的故障定位方法，如相关系数法、极性比较法等，需要将完整的暂态 0 模电流信号通过通信网络上传主站，传输数据量大。配电自动化系统通道带宽有限，难以传输故障录波等批量数据，利用 GPRS 的无线传输也不能实现故障信息的批量传输。

(5) 定位装置不能自动上报故障

现有的一些故障定位装置在灵敏度、采样频率、可靠性、数据远传等方面存在缺陷。例如，现有的故障指示器检测到故障后，通过指示灯或者翻牌的方式就地报警，不能实现数据上传，工作人员需进行巡线查找故障点，费时费力，不能在最短的时间内发现并隔离故障区域。



1.6 人工智能算法在电力系统中的应用

随着计算机技术的飞速发展，人工智能算法的应用领域也越来越广泛。人工智能算法主要包括：粗糙集理论、模糊集理论、人工神经网络、遗传算法、人工免疫算法、蚁群算法、模拟退火算法和多 Agent 系统等。近年来，智能算法也开始在电力系统中被广泛应用。

（1）粗糙集理论

粗糙集理论是一种处理模糊性和不确定性问题的新型数学工具，能够在保留关键信息的前提下对知识进行处理，并求得知识的最小表达。在电力系统中，该理论已应用于变压器故障诊断、负荷预测、配电网故障诊断、暂态稳定评估和输电线系统故障诊断等领域。

（2）人工神经网络

人工神经网络技术在近 20 年内发展迅速，凭借其良好的并行处理能力、自适应能力及联想记忆能力解决了很多挑战性的工程实际问题。在电力系统中，神经网络已应用于变压器故障诊断、负荷预测、配电网故障诊断、故障定位、谐波检测和暂态稳定评估等领域。

（3）模糊集理论

模糊集理论是处理复杂不确定问题的方法，是用数学方法研究和处理具有“模糊”现象的一门科学。模糊集理论已广泛应用于电力系统的变压器故障诊断、负荷预测、电网故障诊断、故障测距、电网规划和故障选相等领域。



(4) 遗传算法

遗传算法是在生物进化的启示下,得到的一种搜索和自适应算法。它能在复杂而庞大的搜索空间中自适应地搜索,找出最优或准最优解,且算法简单、实用性强、鲁棒性强。遗传算法对待求解问题几乎没有什么限制,也不涉及常规优化问题求解的复杂数学过程,并能够得到全局最优解或局部最优解。在电力系统中,遗传算法已应用于电力系统的电网规划、配电网重构有功优化调度、无功规划和故障定位等领域。

(5) 智能算法的综合

近年来,各种智能算法的应用在广度和深度方面都得到了发展,但依靠单一智能技术有时难以满足任务要求,由两种以上智能算法构成的混合系统在电力系统中也开始应用。

1) 粗糙集与模糊集理论的结合。文献[106]将粗糙集理论和模糊理论结合实现变压器故障诊断。

2) 粗糙集与神经网络的结合。文献[107]将粗糙集理论与神经网络组合应用于配电网故障诊断,文献[108]采用粗糙集理论建立神经网络负荷预测模型。

3) 模糊集与神经网络的结合。文献[109~112]将模糊集和神经网络相结合用于负荷预测,文献[113]将模糊集与神经网络相结合应用于电网故障诊断,文献[114]将粗糙集与神经网络结合应用于故障定位,文献[115]将粗糙集与神经网络结合应用于暂态稳定控制。

4) 模糊集理论与遗传算法的结合。文献[116]将模糊集与遗传算法相结合应用与电力负荷预测。

智能算法已在电力系统中广泛应用并取得了良好的效果,表现出其巨大的发展潜力。近年来,智能算法也开始应用于小电流接地系统的单相接地故障选线与定位,如基于模糊理论的故障选



线、基于神经网络的故障选线、基于粗糙集理论的故障选线、基于模糊神经网络的故障选线、基于遗传神经网络的故障选线、基于神经网络的故障定位、基于遗传算法的故障定位和基于粒子群算法的故障定位等。但是人工智能算法在小电流接地故障选线和定位中的应用尚处在起步阶段，很多技术需要深入研究。因而，研究人工智能算法在小电流接地故障选线和定位中的应用具有重大的意义。

1.7 本书内容摘要

1.7.1 本书研究的主要工作概述

(1) 小电流接地系统单相接地故障特征分析

分析了中性点不接地和经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时的基波稳态零序电流、暂态零序电流和谐波零序电流的故障特征，并对小电流接地故障的模量特征进行了分析。在此基础上确定了在进行小电流接地故障选线和定位时应提取的故障特征。

(2) 基于故障暂态特征的小波包故障选线方法分析

分析了基于故障暂态特征的小波包故障选线方法的优点和不足，通过仿真分析可知，暂态零序电流信号经过低频采样后幅值发生了不同程度的衰减。在采样后故障线路的暂态零序电流信号的幅值衰减严重时，小波包故障选线方法可能出现“误选”现象。所以需要对衰减的信号进行增强处理，衰减越严重、越可能是故障线路的信号，需要增强的比例就要越大。

(3) 提出了基于粗糙集信号增强的小波包选线新方法

分别对零序电流信号进行高频采样和低频采样，从低频采样信号中提取信号的最大幅值和工频分量的有效值，从高频采样信



号中提取信号的最大幅值和首波头极性。然后,计算高频采样和低频采样后信号衰减比,将工频分量的有效值、高频采样信号的首波头极性和低频采样后信号的幅值衰减比作为信息系统的条件属性,利用粗糙集理论提取决策规则,确定低频采样信号需要增强的比例系数,实现对低频采样信号的增强。最后,利用小波包分析方法对增强的零序电流信号分解,实现故障选线。仿真结果表明,该方法无论是在能量衰减严重时还是在首波头检测错误时均能实现正确选线。

(4) 定义了各种故障特征的故障测度

分别采用小波包分析方法、有功分量法、五次谐波法和基波幅值法从零序电流信号中提取暂态分量、有功分量、五次谐波分量和基波分量故障特征,并根据每种故障特征的特点分别定义了它们的故障测度。

(5) 提出了基于粗糙集理论的融合选线方法

将采用小波包分析方法、有功分量法、五次谐波法和基波幅值法从零序电流信号中提取暂态分量、有功分量、五次谐波分量和基波分量的故障特征,并计算出它们的故障测度,以它们的故障测度作为信息系统的条件属性,线路的故障状态作为决策系统的决策属性,提出了基于粗糙集理论的融合选线方法。仿真和现场验证表明,该方法充分利用了暂态和稳态故障特征信息,具有较高的选线准确度和较强的鲁棒性。

(6) 提出了基于神经网络的融合选线方法

由仿真结果可知,基于粗糙集理论的融合选线方法的选线准确度依然不是很高,还可以用其他精度更高的智能算法替代以提高选线准确度。因此,在该选线方法基础上,提出了基于神经网络的融合选线方法。利用经过粗糙集属性约简后得到的最小属性集中对应的故障特征的故障测度作为神经网络的输入,融合后的



总故障测度作为神经网络的输出。构建了基于神经网络的融合选线方法。仿真和现场验证表明，该方法选线准确度高于基于粗糙集理论的融合选线方法。

(7) 提出了基于粗糙集理论的样本归一化方法

针对神经网络的不同类样本距离较近时神经网络训练时间较长的问题，提出了基于粗糙集理论的样本归一化方法。首先按照基于粗糙集理论的故障选线方法建立决策表，根据样本距离其他类样本的最小距离对其进行拉伸处理，然后对其归一化处理，利用归一化的数据对神经网络进行训练。以小电流接地故障选线为例对该方法进行了验证，验证结果表明，采用此方法进行样本归一化的神经网络的训练时间明显小于普通样本归一化方法的训练时间。

(8) 通过仿真试验得到大量的单相接地故障数据

利用电磁暂态仿真软件 EMTP-ATP 建立了小电流接地系统的仿真模型。根据各种故障情况进行了大量的仿真试验，得到的仿真数据可以用于各种故障选线和定位方法的分析。

(9) 提出了小电流接地故障智能选线装置的设计方案

以基于神经网络的融合选线方法为判据，设计出了小电流接地系统故障选线装置的总体结构方案、主要的硬件电路设计方案和主程序软件流程。

(10) 提出了基于暂态信息的小电流接地故障定位方法

通过对 0 模电流的特征分析，提出了基于复合导纳的小电流接地故障定位方法，并进行了仿真和实验验证。

(11) 提出了智能配电网故障定位关键技术

针对智能电网的要求，设计了智能配电网模型和智能终端单



元模型,提出了基于 Multi-Agent 的智能配电网故障定位方法。

1.7.2 本书的章节安排

第1章 配电网概述。阐述配电网的现状和面临的困难,分析了小电流接地故障选线和定位的难点,回顾已有故障选线和定位方法并评价了其优缺点,介绍了智能算法在电力系统中的应用,最后给出了全书的主要工作和章节安排。

第2章 小电流接地系统单相接地故障特征分析。分析了中性点不接地和经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时的稳态零序电流、暂态零序电流和谐波零序电流的故障特征,并分析小电流接地故障的模量特征。在此基础上,确定了小电流接地故障选线和定位应该提取的故障特征。

第3章 基于故障暂态特征信息的智能选线研究。分析了基于故障暂态特征的小波包故障选线方法的优点和不足,提出了首先利用粗糙集理论对低频采样的信号进行增强处理,然后再利用小波包分析方法进行故障选线的智能选线方法。

第4章 基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线研究。分别定义了零序电流的暂态分量、有功分量、五次谐波分量和基波分量的故障特征的故障测度函数。在此基础上提出了基于粗糙集融合的故障选线方法。针对粗糙集理论分类精度较低的缺点,在基于粗糙集融合的故障选线方法的基础上,提出了准确度更高的基于神经网络融合的故障选线方法。针对神经网络训练时间比较长的缺点,提出了基于粗糙集理论的样本归一化方法,并将该方法应用于基于神经网络的融合选线中。仿真结果表明,利用基于粗糙集理论的样本归一化方法的神经网络的训练速度明显提高。

第5章 小电流接地故障选线方法的仿真及现场验证。首先通过仿真试验验证了基于粗糙集理论和小波包分析的故障选线方法的选线准确度明显高于通常的小波包选线方法。然后通过仿真



和现场数据分别验证了基于粗糙集理论的融合选线方法和基于神经网络的融合选线方法。验证结果表明，利用基于神经网络的融合选线方法的选线准确度高于基于粗糙集理论的融合选线方法。因而得出结论，应该采用基于神经网络的融合选线方法作为小电流接地故障选线装置的选线判据。

第 6 章 小电流接地故障选线装置设计。以基于神经网络的融合选线方法为判据，提出了小电流接地故障选线装置的设计方案。

第 7 章 基于暂态特征信息的小电流接地故障定位方法研究。通过分析 0 模电流的特点，提出基于复合导纳的小电流接地故障定位方法，并将该方法与其他故障定位进行比较，指出该方法的优点。

第 8 章 小电流接地故障定位方法的仿真与试验验证。利用仿真和实验数据对基于复合导纳的小电流接地故障定位方法进行验证。

第 9 章 智能配电网故障定位关键技术初探。给出了智能配电网模型和智能终端单元模型，并提出了基于 Multi-Agent 的智能配电网故障定位方法。

第 2 章 小电流接地系统单相接地故障特征分析

对于小电流接地系统，中性点接地方式一般为中性点经消弧线圈接地或中性点不接地，当发生单相接地故障时，由于不能构成低阻抗的短路回路，接地短路电流很小。据电力运行部门统计，单相接地故障发生率最高，且由于发生单相接地故障后，非接地相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，为防止故障扩大，必须发出信号并排除故障。为了正确地选出故障线路并对故障定位，需要对小电流接地系统单相接地故障的故障特征进行详细分析，以便提取有效的故障特征，确定正确的故障选线和定位方法。

本章简要介绍了小电流接地系统的中性点接地方式，详细分析了小电流接地系统单相接地故障的故障特征，重点分析了单相接地故障时零序电流的稳态特征、暂态特征和谐波特征，确定了小电流接地系统单相接地故障选线应该提取的零序电流的故障特征，并在基于零序网络模型基础上，提出了由线模电感和 π 型电路组成的简化模型。在对暂态信号进行了频域分析的基础上，建立了特征频段内的 0 模网络模型，为后续研究奠定理论基础。

2.1 小电流接地系统的中性点接地方式

小电流接地系统包括：中性点不接地系统、中性点经消弧线圈接地系统（谐振接地系统）和中性点经高电阻接地系统。我国主要采用中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统。



2.1.1 中性点不接地方式

配电网中性点不接地（绝缘）是一种最简单的方式。在这样的系统中，变压器中性点悬空，与大地完全没有电气连接。当这种系统发生单相接地故障时，依靠线路对地电容构成故障回路，流经接地点的电流主要是电容电流，接地电流的大小取决于变电所出线的类型和长度。由于没有任何感性电流补偿，接地电流有可能会较大，特别是出线较多，线路较长，或者包含大量电缆线路（电缆要比同样长度架空线的电容电流大 25~50 倍）的变电所，接地的容性电流会达到几十安培甚至上百安培，给系统安全带来隐患，所以此种接地方式主要应用在变电站出线以架空线路为主、单相接地故障大多是可恢复的绝缘故障、对运行的可靠性要求较高、而系统的对地电容较小的系统中。

我国中、低压电网中性点一般采用不接地方式，它的特点是结构简单、不需要在中性点增加任何设备，适用于单相接地电容电流较小（一般不大于 10A）的系统。

但是，中性点不接地电网在单相接地的暂态过程中会产生谐振过电压和弧光接地过电压，同时会产生较大的过电流。谐振电压主要是由于电压互感器和线路电容产生谐振，产生过电压或过电流。弧光接地过电压是由于电网发生单相接地电弧重燃引起的，接地电弧能量大，持续时间长，可能损坏绝缘，烧坏导线，甚至烧坏相间绝缘而引起相间短路。

2.1.2 中性点经消弧线圈接地方式

对出线较多，线路较长，或者包含大量电缆线路的系统，当其电容电流超过一定数值时，在单相接地故障时电弧不易熄灭，必须采用中性点经消弧线圈接地的方式运行。

中性点经消弧线圈接地的电力系统，称为谐振接地系统。因



为消弧线圈是一种补偿装置，故通常又称为补偿系统。消弧线圈是德国彼得生（W. Petersen）于1916年发明的，所以有时称为彼得生线圈。在美国又称为补偿装置（Ground Fault Neutralizer）等。消弧线圈是具有一定容量的单相电感线圈，一般是一个带铁心的扼流线圈，外形类似变压器。它接在变压器的中性点与大地之间，构成另一个回路，使接地点的接地相电流中增加了一个感性电流分量，它与流过接地点的容性电流分量相抵消，大大减小了接地点的电流，使电弧易于自行熄灭，接地电弧不能重燃，从而将单相电弧接地过电压限制在2.3~3.2倍额定相电压以内，提高了供电可靠性。同时，采用消弧线圈接地的系统还可以有效地防止电压互感器的铁磁谐振过电压。因此，这种接地方式得到了广泛的应用。

根据对电容电流补偿度的不同，消弧线圈有完全补偿、欠补偿和过补偿三种工作方式。为了避免电网正常运行时出现谐振过电压，消弧线圈一般工作在过补偿方式。对于预调式的消弧线圈一般工作在过补偿方式；对于随调式的消弧线圈一般工作在接近完全补偿方式。

小电流接地系统发生单相接地故障时，电网的零序电压升高，可根据零序电压的大小来判断电网是否发生了单相接地故障。但若选出哪条出线发生了故障，利用零序电压的故障特征是无法判断的，而各出线的零序电流信号是不同的，可以根据各出线的零序电流信号来判断哪条出线发生了故障。下面对小电流接地故障时零序电流的稳态、暂态和谐波故障特征进行分析。

2.2 小电流接地系统单相接地故障的基波稳态特征分析

对于中性点不接地和经消弧线圈接地的电网，当发生单相接



地故障时，两者稳态情况下的基波零序电流分布情况有所不同，下面分别进行讨论。

2.2.1 中性点不接地系统单相接地故障的基波稳态特征分析

(1) 基波稳态故障特征

在中性点不接地系统中，假定有三条长度不等的线路，线路 3 的 A 相发生单相金属性接地时，电网中基波电容电流的分布状况如图 2-1 所示。图中假定正常运行情况下的三相电压对称平衡，三相对地电容相等，同时忽略三相对地电导。

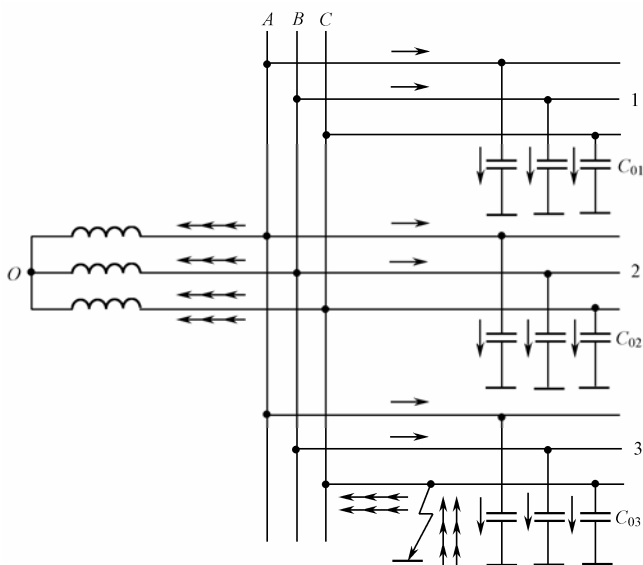


图 2-1 中性点不接地系统单相接地时电容电流分布



对于非故障线路 1 来说，其三相对地电容电流分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{C_{A1}} &= j\dot{U}'_A \omega C_{01} \\ \dot{I}_{C_{B1}} &= j\dot{U}'_B \omega C_{01} \\ \dot{I}_{C_{C1}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中： $\dot{I}_{C_{A1}}$ 、 $\dot{I}_{C_{B1}}$ 、 $\dot{I}_{C_{C1}}$ 分别为线路 1 的 A、B、C 各相的对地电容电流， \dot{U}'_A 、 \dot{U}'_B 分别为故障电网的 A 相和 B 相对地电压， ω 为电网的角频率 ($2\pi f$)， C_{01} 为线路 1 的单相对地电容（为使问题简单化，认为三相相等）。

这样，非故障线路 1 的基波零序电流可用下式求得

$$3\dot{I}_{01} = \dot{I}_{C_{A1}} + \dot{I}_{C_{B1}} + \dot{I}_{C_{C1}} = j3\dot{U}_0 \omega C_{01} \quad (2-2)$$

式中： \dot{I}_{01} 为线路 1 的基波零序电流， \dot{U}_0 为电网的零序电压。

由式 (2-2) 可知，线路 1 的零序电流 $3\dot{I}_{01}$ 的大小等于该线路三相对地电容电流的向量和，方向是从母线流向线路。

同理，非故障线路 2 的基波零序电流为： $3\dot{I}_{02} = j3\dot{U}_0 \omega C_{02}$ ，其方向与线路 1 相同，从母线流向线路（如果电网中有更多的线路，皆可依次类推）。

对于故障线路 3 来说，健全相的电容电流仍用同样的方法求得，只是故障相的电容电流不再为零。此时，三相的电容电流分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{C_{A3}} &= j\dot{U}'_A \omega C_{03} \\ \dot{I}_{C_{B3}} &= j\dot{U}'_B \omega C_{03} \\ \dot{I}_{C_{C3}} &= -j3\dot{U}_0 \omega (C_{01} + C_{02} + C_{03}) \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

同样，可求得故障线路 3 的基波零序电流为

$$3\dot{I}_{03} = -3(\dot{I}_{01} + \dot{I}_{02}) \quad (2-4)$$

式 (2-4) 说明，故障线路的零序电流等于所有非故障线路零序电流的向量和，方向由线路流向母线。



(2) 基波有功分量的故障特征

由于线路电阻和电导与电抗相比影响很小，所以一般分析的时候可以将其忽略，不会影响分析的精度。但是在分析有功分量规律时就不能将其忽略了。

利用叠加原理，可以将无功分量和有功分量分开来考虑。分析有功分量的时候可以只考虑有功分量的电路。中性点不接地系统单相接地故障时零序有功分量电流分布如图 2-2 所示。

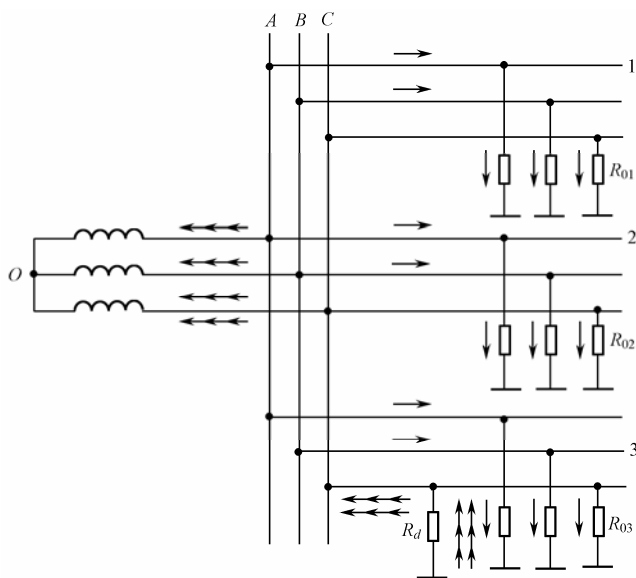


图 2-2 中性点不接地系统单相接地故障时零序有功分量电流分布

中性点不接地系统单相接地故障时零序有功分量等效电路图如图 2-3 所示。

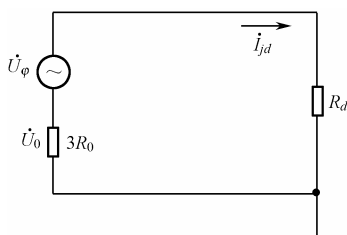


图 2-3 中性点不接地系统单相接地故障时零序有功分量等效电路图

因为线路零序电阻和线路对地电容是并联关系，因此，中性点的电压主要是由零序无功分量决定，零序有功分量几乎没有什么影响。

线路 1:

$$\begin{aligned} 3\dot{I}_{01} &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = \dot{U}'_A / R_{01} + \dot{U}'_B / R_{01} + \dot{U}'_C / R_{01} \\ &= (\dot{U}_0 + \dot{U}_A) / R_{01} + (\dot{U}_0 + \dot{U}_B) / R_{01} + (\dot{U}_0 + \dot{U}_C) / R_{01} \quad (2-5) \\ &= 3\dot{U}_0 / R_{01} \end{aligned}$$

即非故障线路流过本身的有功电流，方向与 \dot{U}_0 相同。

线路 3:

$$\dot{I}_{C3} = -(\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{A3} + \dot{I}_{B3}) \quad (2-6)$$

$$3\dot{I}_{03} = \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} = -3(\dot{I}_{01} + \dot{I}_{02}) \quad (2-7)$$

即故障线路零序有功电流大小为非故障线路零序有功电流之和，方向与非故障线路相反。显然当母线故障时，所有线路都流过本身的零序有功电流，方向与 \dot{U}_0 相同。

2.2.2 消弧线圈接地系统单相接地故障的基波稳态特征分析

(1) 基波稳态故障特征

在中性点经消弧线圈接地电网（图 2-4）中，当线路 3 发生单



相接地故障时，同样不考虑对地电导的影响，线路 1 和线路 2 的零序电流分布状况与中性点不接地电网中的非故障线路的情况相同，仍然分别为 $3\dot{I}_{01} = j3\dot{U}_0\omega C_{01}$ 、 $3\dot{I}_{02} = j3\dot{U}_0\omega C_{02}$ ，其大小和方向均不变。

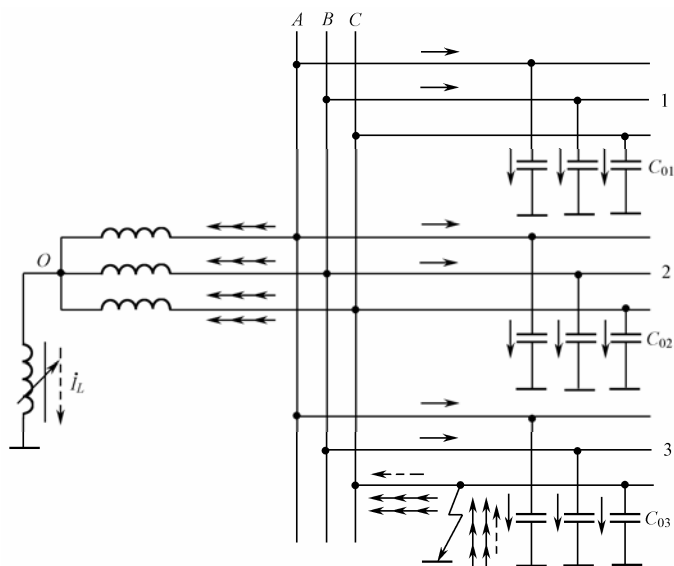


图 2-4 中性点经消弧线圈接地电网单相接地时电流分布

由于中性点接地方式不同，此时故障点的接地电流由原来的电容电流变为由消弧线圈产生的电感电流补偿后的残流，仍具有零序性质。此时线路 3 的基波零序电流为

$$3\dot{I}_{03} = -3(\dot{I}_{01} + \dot{I}_{02}) - \dot{I}_L \quad (2-8)$$

定义失谐度为

$$v = (I_C - I_L) / I_C \quad (2-9)$$

式中： I_C 为电网对地电容电流之和， I_L 为消弧线圈产生的电感电流。

这样，式 (2-8) 又可以写成



$$3\dot{I}_{03} = -j3\dot{U}_0\omega[v(C_{01} + C_{02}) + (v-1)C_{03}] \quad (2-10)$$

由式(2-10)可知,在中性点经消弧线圈接地电网中,随着消弧线圈的补偿程度不同,故障点零序电流的方向不同。实际中广泛采用消弧线圈过补偿方式,在过补偿状态下,故障线路和非故障线路的基波零序电流的方向相同,因此就不能用基波零序电流的方向来选出故障线路,而且通常消弧线圈靠近谐振点运行,故其数值也很小,因此也不能用比较大小的方法来选出故障线路。

(2) 基波有功分量的故障特征

分析零序有功分量时,中性点经消弧线圈接地系统与中性点不接地系统相比,主要差别相当于在中性点接入一个电阻,此电阻为消弧线圈的电阻。

中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障时零序有功分量电流分布如图2-5所示。可以得到此时的等效电路图如图2-6所示。

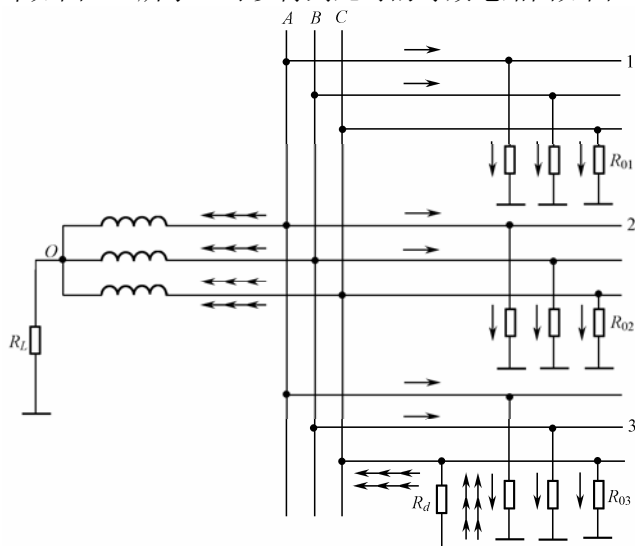


图 2-5 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障时零序有功分量电流分布

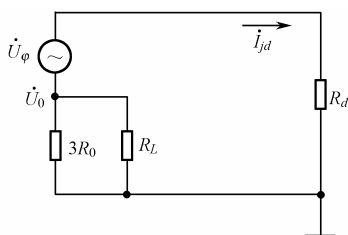


图 2-6 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障时
零序有功分量等效电路图

中性点经消弧线圈接地系统的中性点电压和中性点不接地系统的一样，主要是有零序无功分量决定，零序有功分量几乎没有影响。

线路 1:

$$\begin{aligned} 3\dot{I}_{01} &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = \dot{U}'_A / R_{01} + \dot{U}'_B / R_{01} + \dot{U}'_C / R_{01} \\ &= (\dot{U}_0 + \dot{U}_A) / R_{01} + (\dot{U}_0 + \dot{U}_B) / R_{01} + (\dot{U}_0 + \dot{U}_C) / R_{01} \quad (2-11) \\ &= 3\dot{U}_0 / R_{01} \end{aligned}$$

即非故障线路流过本身的有功电流，方向与 \dot{U}_0 相同。

线路 3:

$$\dot{I}_{C3} = -(\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{A3} + \dot{I}_{B3}) - \dot{I}_L \quad (2-12)$$

$$3\dot{I}_{03} = \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} = -3(\dot{I}_{01} + \dot{I}_{02} + \dot{I}_L) \quad (2-13)$$

即故障线路零序有功电流大小为非故障线路零序有功电流与消弧线圈零序有功电流之和，方向与非故障线路相反。显然当母线故障时，所有线路都流过本身的零序有功电流，方向与 \dot{U}_0 相同。

由小电流接地系统单相接地故障时的稳态特征分析可知，对于中性点不接地电网，可利用零序电流基波量的大小和方向构成选线判据，即基波比幅比相法，也可以利用故障线路的零序有功电流幅值大且方向与其他线路相反的原理实现中性点不接地系统的故障选线，即有功分量故障选线方法。对于中性点经消弧线圈



接地的电网，在处于过补偿状态时，基波比幅比相法不能作为选线判据，而有功分量故障选线方法仍然有效。

2.3 小电流接地系统单相接地故障的暂态特征分析

由于故障后稳态分量的数值小，难以正确选出故障线路，所以人们又把目光投向了故障后的暂态分量，希望利用幅值较大的暂态分量形成有效的选线判据。

当中性点经消弧线圈接地电网发生单相接地故障的瞬间，可利用图 2-7 所示的等效电路来分析暂态电容电流和暂态电感电流。图中 C 表示电网的三相对地电容总和； L_0 表示三相线路和变压器等在零序回路中的等值电感； R_0 表示零序回路中的等值电阻（包括故障点的接地电阻、导线电阻和大地电阻）； r_L 、 L 分别表示消弧线圈的有功损耗电阻和电感； u_0 为零序电压。

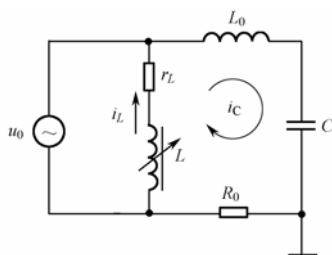


图 2-7 暂态过程的等效电路

（1）暂态电容电流

在分析电容电流的暂态特性时，因其自由振荡频率一般较高，考虑到 $L \ll L_0$ ，故图 2-7 中的 r_L 和 L 可以不予考虑，这样利用 L_0 、 C 、 R_0 组成的串联回路和作用其上的零序正弦电压 u_0 ，便可确定暂态电容电流。



根据图 2-3 不难写出下面的微分方程式：

$$R_0 i_C + L_0 \frac{di_C}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2-14)$$

式中： U_m 为零序电压的幅值。

当 $R_0 < 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$ 时，回路电流的暂态过程具有周期性的振荡及衰减特性；当 $R_0 \geq 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$ 时，回路电流则具有非周期性的振荡衰减特性，并逐渐趋于稳定状态。

因为通常架空线路的波阻抗为 $250 \sim 500\Omega$ ，同时，故障点的接地电阻一般较小，一般都能满足 $R_0 < 2\sqrt{\frac{L_0}{C}}$ 的条件，所以电容电流具有周期性的衰减振荡特性，其自由振荡频率一般为 $300 \sim 1500\text{Hz}$ 。电缆线路的电感较架空线路小得多，而对地电容却较后者大许多倍，故电容电流暂态过程的振荡频率很高，持续时间很短，其自由振荡频率一般为 $1500 \sim 3000\text{Hz}$ 。

因为暂态电容电流 i_C 是由暂态自由振荡分量 $i_{C.os}$ 和稳态工频分量 $i_{C.st}$ 两部分组成的，利用 $t=0$ 时 $i_{C.os} + i_{C.st} = 0$ 这一初始条件和 $I_{Cm} = U_m \omega C$ 的关系，经过拉普拉斯变换等运算可得：

$$\begin{aligned} i_C &= i_{C.os} + i_{C.st} \\ &= I_{Cm} \left[\left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi) \right] \end{aligned} \quad (2-15)$$

式中： I_{Cm} 为电容电流的幅值； ω_f 为暂态自由振荡分量的角频率；

$\delta = \frac{1}{\tau_C} = \frac{R}{2L_0}$ ，为自由振荡分量的衰减系数，其中的 τ_C 为回路的时间常数； φ 为故障时相电压的相角。

若系统的运行方式不变，则 τ_C 为一常数。当 τ_C 较大时，自由



振荡衰减较慢；反之，则衰减较快。因为式（2-15）的自由振荡分量 $i_{C.os}$ 中含有 $\sin \varphi$ 和 $\cos \varphi$ 两个因子，故从理论上讲，在相角为任意 φ 值发生接地故障时，均会产生自由振荡分量。当 $\varphi=0$ 时，其值最小；当 $\varphi=\pi/2$ 时，其值最大。

当故障相在电压峰值，即 $\varphi=\pi/2$ 接地时，电容电流的自由振荡分量的振幅出现最大值 $i_{C.os \max}$ ，时间 $t=T_f/4$ （ $T_f=2\pi/\omega_f$ 为自由振荡的周期），其值为

$$i_{C.os \max} = I_{Cm} \frac{\omega_f}{\omega} e^{\frac{T_f}{4\tau}} \quad (2-16)$$

由上式可知，暂态自由振荡电流分量的最大值 $i_{C.os \max}$ 与自由振荡频率 ω_f 和工频频率 ω 之比（ ω_f/ω ）成正比。

当故障相在电压零值（ $\varphi=0$ ）时接地，暂态自由振荡电流的幅值最小，并在 $t=T_f/2$ 时出现，该自由振荡电流分量的最小值 $i_{C.os \min}$ 为

$$i_{C.os \min} = I_{Cm} e^{-\frac{T_f}{2\tau}} \quad (2-17)$$

由上式可知，此时暂态电流的自由振荡分量，恰好与工频电容电流的幅值相等。因此，若在 $\varphi=0$ 时发生单相接地故障，就不会产生暂态电容电流分量。

（2）暂态电感电流

消弧线圈的电感电流是由暂态的直流分量和稳态的交流分量组成的，表达式如下：

$$i_L = I_{Lm} \left[\cos \varphi e^{\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (2-18)$$

式中： τ_L 为电感回路的时间常数； $I_{Lm} = \frac{U_m}{\omega L}$ ； φ 为故障时相电压的相角。



暂态过程的振荡角频率与电源的角频率相等，且其幅值与接地瞬间电源电压的相角 φ 有关，当 $\varphi=0$ 时，其值最大；当 $\varphi=\pi/2$ 时，其值最小。若 $\varphi=0$ 时发生单相接地故障，经过半个工频周期后， i_L 达到最大值：

$$i_{L\max} = I_{Lm} \left(1 + e^{-\frac{r_L}{\omega L} \pi} \right) \quad (2-19)$$

同时理论分析表明，电感电流暂态过程长短与接地瞬间的电压相角、铁心的饱和程度有关。若 $\varphi=0$ ，则电感电流的直流分量较大，时间常数较小，大约在一个工频周波之内便可衰减完毕。若 $\varphi=\pi/2$ ，则电感电流的直流分量较小，时间常数较大，一般为2~3周波，有时可持续3~5周波，而且其频率和工频相同。

(3) 暂态接地电流

暂态接地电流由暂态电容电流和暂态电感电流叠加而成，其特征随两者的具体情况而定。从上面的分析可知，虽然两者的最大值相差不大，但频率却相差悬殊，故两者不可能相互补偿。在暂态过程的初始阶段，暂态接地电流的特征主要由暂态电容电流的特征所决定。为了平衡暂态电感电流中的直流分量，于是暂态接地电流中便产生了与之大小相等、方向相反的直流分量，它虽然不会改变首半波的极性，但对幅值却能带来明显的影响。

对于中性点不接地电网，暂态等值回路仅相当于把图2-3中的 r_L 和 L 开路，暂态电流的分析过程与上述暂态电容电流的分析基本相同，不再赘述。

综上分析可知，当单相接地故障发生后，不论电网的中性点是不接地还是经消弧线圈接地，故障初期的暂态电流的幅值和频率均主要由暂态电容电流确定，其幅值同时和初始相角有关。当故障发生在相电压瞬时值接近于最大值的瞬间时，电容电流有最大值，当单相接地故障发生在相电压瞬时值为零的附近，则电容电流的暂态分量很小。



故障初始的暂态电流的幅值和频率主要由暂态电容电流所确定，而暂态电容电流的分布与中性点不接地系统中的电容电流分布情况类似，由此得到小电流接地系统单相接地故障时暂态零序电流分量有以下特点：

(1) 线路故障时，所有非故障线路的暂态零序电流方向（从母线流向线路）与故障线路的暂态零序电流方向相反（即故障线路电流由线路流向母线），且故障线路的暂态零序电流的幅值较非故障线路大。

(2) 母线故障时，所有线路的零序电流的极性都相同（即各线路的暂态零序电流都从母线流向线路）。

(3) 暂态零序电流的数值较稳态值大很多，且持续时间短，约为 0.5~1.0 个工频周波。

由暂态过程的分析可知，配电网出现单相接地故障时，其暂态过程存在着丰富的故障信息，又因为故障时的暂态过程不受接地方式的影响，即中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统故障时的暂态过程基本是相同的，因此，零序电流的暂态分量在故障选线中有着非常重要的意义。

2.4 小电流接地系统单相接地故障的谐波特征分析

在中性点经消弧线圈接地系统中，消弧线圈的补偿是针对零序基波电流，其容量主要依据电网的总电容电流来确定，因此消弧线圈的电抗 L 满足

$$X_L = \omega_0 L = k \frac{1}{\omega_0 \sum C_i} = kX_C \quad (2-20)$$

其中 C_i 是各条出线的零序对地电容，补偿系数 k 接近于 1。然而对于 k 次谐波，在中性点谐波电压下，电容的容抗将减



少至基波情况的 k 分之一,而消弧线圈的电抗则要增加至基波情况的 k 倍。所以对谐波电流,消弧线圈的阻抗要比全部分布电容的阻抗大的多,从而不会对零序谐波电流的大小和方向有大的影响。因此,中性点经消弧线圈接地系统和中性点不接地系统的谐波分量有相同的规律。

在电力系统中含量比较大的谐波主要是奇数次谐波,且随着谐波频率的增加含量越来越少。三次谐波电流会在变压器三角形一侧形成环流,因此一般其含量很小。系统中含量较大的是五次谐波,下面将主要分析小电流接地系统中的五次谐波分量。

当某一相发生接地故障时,相当于在该相对地电容中并联接入故障电阻 R_d ,此时的情况和中性点不接地的情况非常类似,仅仅是电容的容抗值、谐波电压和谐波电流的幅值不同,电路图如图 2-1 所示。电力系统中的谐波,主要来源于非线性负载,非线性负荷可认为是谐波电流源,系统中的畸变的电流,引起电压波的畸变,产生了谐波电压。

线路 1:

$$\begin{aligned} 3\dot{I}_{01} &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = j5\omega C_{01}\dot{U}'_{A} + j5\omega C_{01}\dot{U}'_{B} + j5\omega C_{01}\dot{U}'_{C} \\ &= j5\omega C_{01}(\dot{U}_0 + \dot{U}_A) + j5\omega C_{01}(\dot{U}_0 + \dot{U}_B) + j5\omega C_{01}(\dot{U}_0 + \dot{U}_C) \\ &= j3\dot{U}_0 5\omega C_{01} \end{aligned} \quad (2-21)$$

即非故障线路流过本身的五次谐波电容电流,方向超前零序谐波电压 \dot{U}_0 90° 。

线路 3:

$$\dot{I}_{C3} = -(\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{A3} + \dot{I}_{B3}) \quad (2-22)$$

$$3\dot{I}_{03} = \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} = -3(\dot{I}_{01} + \dot{I}_{02}) \quad (2-23)$$

即故障线路零序五次谐波电流大小为非故障线路零序五次谐波电流之和,方向与非故障线路相反。



显然当母线故障时，所有线路都流过本身的零序五次谐波电流，方向超前零序谐波电压 \dot{U}_0 90° 。

因此，利用故障线路的零序五次谐波电流幅值大且方向与其他线路相反的原理可以实现中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统的故障选线，即五次谐波故障选线方法。

2.5 小电流接地系统的模量分析

2.5.1 基于线路分布参数的高精度复合模网

对于三相系统，由于各相线路间存在电磁耦合即互感和分布电容的影响，直接在相域分析单相接地故障的暂态过程十分困难，因此，需要通过坐标变换，将相域系统变换为没有耦合的模域系统。

常用的对称分量变换（C.L.Fortescue 福特斯库变换）用于分析暂态过程较为复杂，双轴变换（R.H.Park 派克变换）主要用于分析对称故障，瞬时值对称分量变换的结果为复数，没有明确的物理意义，而克拉克（E.Clarke）变换在单相接地故障时不能获得简单的故障模型结构。下面采用 Karrenbauer 变换将三相系统变化为没有耦合的 0、1、2 模系统，其变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

逆矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

根据对称分量法的变换公式和相模变换公式，三相系统的零序分量与 0 模分量不仅参数和电气特征完全一致，其物理含义也相同，在叙述上对两者不加区分。



以 A 相接地为例，故障点的边界条件为

$$\begin{cases} u_a = 0 \\ i_b = i_c = 0 \end{cases} \quad (2-26)$$

结合相电压与模电压、相电流与模电流关系，可以得到

$$\begin{cases} u_0 + u_1 + u_2 = 0 \\ i_0 = i_1 = i_2 = \frac{1}{3} i_a \end{cases} \quad (2-27)$$

小电流接地故障时，相当于在故障点附加一个与故障前电压幅值相等、极性相反的虚拟电压源，根据边界条件，可以得到图 2-8 所示的基于分布参数的故障分量等效电路。图中： u_f 为虚拟电源，等于故障点故障前的反相电压； R_f 为接地电阻。

暂态过程由电感和电容之间的谐振产生，基于分布参数的故障模型含有多个谐振过程，暂态 0 模电流完整形式可表示为

$$i_{0f} = \sum_{i=0}^N e^{-\delta_i t} A_i \cos(\omega_i t + \alpha_i) \quad (2-28)$$

式中： A 为幅值； ω 为角频率； α 为初相角； δ 为衰减因子。

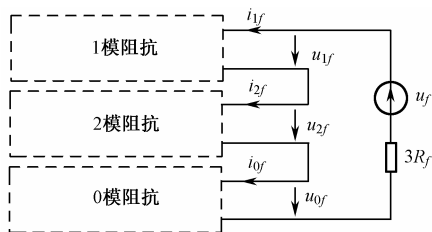


图 2-8 基于分布参数的故障分量等效电路

2.5.2 基于 π 型电路的故障简化模型及特点

(1) 阻抗并联的复合模网模型

对于图 2-8 所示的基于分布参数的复合模网模型，无法利用其



来进行电气量的定量分析和计算，需要对其进行简化。

0、1、2 模阻抗均由两部分阻抗并联而成，一部分为故障点看向母线的等效阻抗 Z_{kb} ($k=0,1,2$)，一部分是从故障点看向负荷侧的等效阻抗 Z_{kl} ($k=0,1,2$)，如图 2-9 所示。图中： Z_{0b} 、 Z_{1b} 、 Z_{2b} 为故障点上游 0、1、2 模阻抗； Z_{0l} 、 Z_{1l} 、 Z_{2l} 为故障点下游 0、1、2 模阻抗； i_{0b} 、 i_{1b} 、 i_{2b} 为故障点上游 0、1、2 模电流； i_{0l} 、 i_{1l} 、 i_{2l} 为故障点下游 0、1、2 模电流。

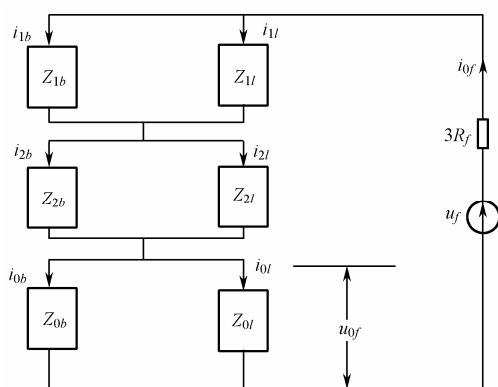


图 2-9 阻抗并联的复合模网络结构图

根据图 2-9，故障点输入模阻抗为

$$Z_k = Z_{kb} // Z_{kl} \quad (k=0,1,2) \quad (2-29)$$

(2) 线模网络的简化

1、2 模网络参数相同，分析过程中不加区别，参数均一致。从故障点看向母线方向的线模阻抗由故障点至母线段线路的线模阻抗、变压器线模阻抗、健全线路线模阻抗及健全线路负荷线模阻抗组成。1 模网络结构示意图如图 2-10 所示。图中， Z_{f1b} 、 Z_{f1l} 为由故障点至母线段、故障点至负荷段线路的线模阻抗； Z_{TA} 、 Z_{TB} 为变压器阻抗； Z_{n11} 为健全线路 1 线模阻抗； Z_{1ld} 为负荷线模阻抗。

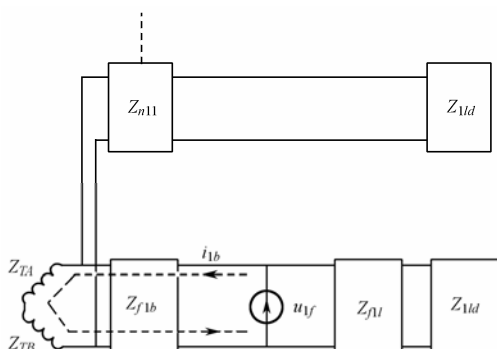


图 2-10 1 模网络结构示意图

故障点的 1 模输入阻抗为

$$Z_1 = Z_{1b} // Z_{1l} = \{Z_{f1b} + [(Z_{TA} + Z_{TB}) // (Z_{n11} + Z_{1ld})]\} // (Z_{f1l} + Z_{1ld}) \quad (2-30)$$

通常情况下，配电系统线路较短，一般在 10km 以内，因此，线路自身线模阻抗较小；而配电系统中每条线路的负荷都不大，因而其负荷阻抗值较大，配电系统负荷的线模阻抗值大约是线路线模阻抗的 100 倍，有

$$\begin{cases} Z_{n11} \square Z_{1ld} \\ Z_{f1l} \square Z_{1ld} \\ Z_{f1b} \square Z_{1ld} \end{cases} \quad (2-31)$$

变压器的阻抗很小，远小于健全线路线模阻抗，

$$Z_{TA} + Z_{TB} \square Z_{n11} + Z_{1ld} \quad (2-32)$$

根据公式 (2-30)、式 (2-31)、式 (2-32)，从故障点向母线看去的线模等效阻抗主要为故障线路故障点到母线段线路的线模阻抗与变压器线模阻抗之和：

$$Z_{1b} \approx Z_{f1b} + Z_{TA} + Z_{TB} \quad (2-33)$$



同时有

$$Z_{1b} \approx Z_{f1b} + Z_{TA} + Z_{TB} \quad Z_{f1l} + Z_{1ld} = Z_{1l} \quad (2-34)$$

根据式 (2-30), 有

$$Z_1 \approx Z_{1b} \quad (2-35)$$

线路的线模电容和线模电阻很小, 可以忽略其影响, 线模阻抗可等效为

$$Z_1 \approx Z_{1b} \approx j\omega(L_{1b} + 2L_T) \quad (2-36)$$

式中: L_{1b} 为故障点至母线段 1 模电感、 L_T 为变压器电感。

根据上述线模阻抗的分析可以发现, 线路中的线模电流主要分布在故障线路故障点至母线段, 健全线路和故障线路故障点至负荷段线模电流很小, 如图 2-11 所示。

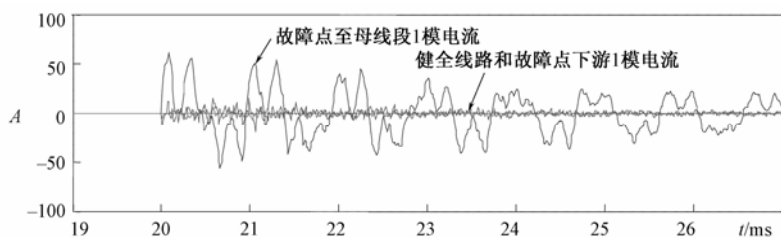


图 2-11 系统中的 1 模电流波形

(3) 0 模网络的简化

负荷的 0 模阻抗很大, 可以看做开路。对于故障点上游 0 模阻抗, 健全线路 0 模阻抗相互并联后再与故障点至母线段线路 0 模阻抗串联。对于 0 模网络, 可以得到如图 2-12 所示的结构示意图。

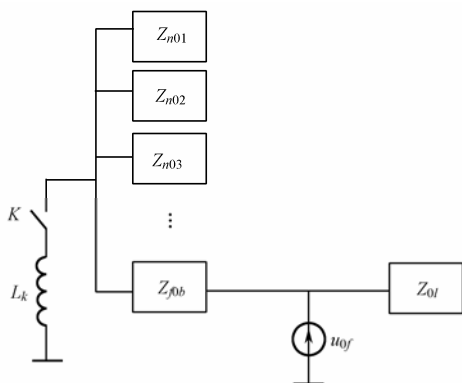


图 2-12 0 模网络结构示意图

图中： Z_{f0b} 、 Z_{0l} 为故障点至母线段、故障点至负荷段线路 0 模阻抗； Z_{n01} 、 Z_{n02} 、 Z_{n03} 为健全线路 1、2、3 的 0 模阻抗； L_K 为消弧线圈电感。

对于线路 0 模阻抗，可用 π 型电路进行等效。分别将故障点上游（包括健全线路）、下游的线路 0 模阻抗用 π 型电路进行等效后，得到基于 π 型电路的 0 模网络简化模型如图 2-13 所示。

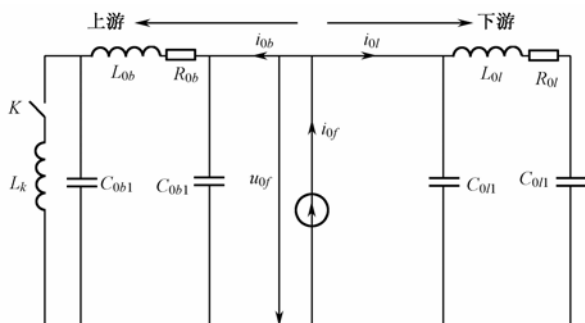


图 2-13 基于 π 型电路的 0 模网络简化模型



图中： L_{0b} 、 L_{0l} 为故障点上游线路（包括故障点至母线段及所有健全线路）、下游线路 0 模电感； C_{0b1} 、 C_{0l1} 为故障点上游（包括故障点至母线段及所有健全线路）、下游线路 0 模电容； R_{0b} 、 R_{0l} 为故障点上游（包括故障点至母线段及所有健全线路）、下游 0 模电阻。

对于 0 模电流，由于故障点两侧 0 模网络参数不同，两侧暂态 0 模电流波形相差较大。由于故障点两侧 0 模电压相同，故障点两侧 0 模电流含有相同频率的电流分量，但是由于两侧 0 模网络参数不同，两侧网络 0 模电流主谐振频率不同，在不同频率下的能量分布不同。

一典型接地故障时，故障点两侧暂态 0 模电流波形如图 2-14 所示，其频谱如图 2-15 所示。

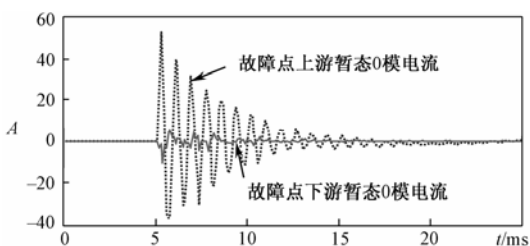


图 2-14 故障点两侧的暂态 0 模电流波形

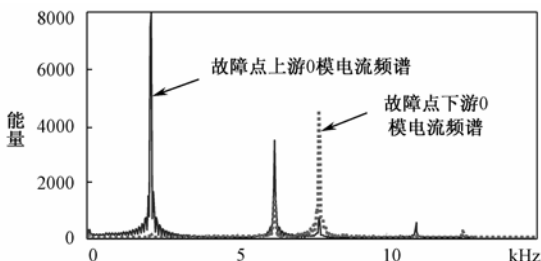


图 2-15 故障点两侧暂态 0 模电流频谱图



(4) 基于 π 型电路的故障简化模型

根据对线模网络和 0 模网络的简化, 图 2-8 所示的基于分布参数的故障模型可以简化为如图 2-16 所示由线模电感和 π 型电路的故障简化模型。图中: R_f 为接地电阻; L_k 为消弧线圈电感; L_x 为 1、2 模网络等效电感之和, 数值上约为 $2(L_{1b} + 2L_T)$ 。

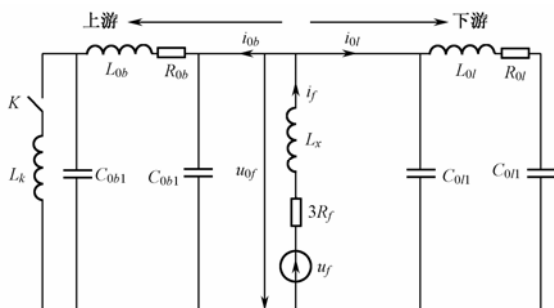


图 2-16 故障简化模型

(5) 简化模型特点

图 2-10 所示的由线模电感和 π 型电路组成的简化模型是对基于零序网络模型的分析方法的改进和完善, 与传统暂态分析方法相比:

- ① 充分考虑了三相线路之间的耦合。
- ② 考虑了线模网络的对暂态过程的影响。
- ③ 将故障点至母线段、故障点至负荷段以及健全线路分开讨论, 根据线路自身特征建立模型。
- ④ 考虑了线路中的变压器、负荷等的影响。
- ⑤ 可以提供暂态 0 模、线模电流在线路中的分布特征, 可以提取故障信息, 用于故障检测。
- ⑥ 可以根据简化模型进行主要电气量的定量计算, 进一步分析主谐振的产生机理。



2.5.3 小电流接地故障频域特征分析

(1) 均匀传输线的传输方程及入端阻抗

将分布参数模型的均匀单相线路看做一个二端口网络，利用传输方程可以获得线路入端阻抗的表示形式，可进一步分析各种条件下入端阻抗特性。

末端带有负荷的均匀传输线，其分布参数模型可以表示如图 2-17 所示。图中： R_u 、 L_u 分别为单位长度来回两根线的电阻、电感； G_u 、 C_u 分别为单位长度来回两根线之间的电导和分布电容； \dot{U}_1 、 \dot{I}_1 分别为入端电压和电流； \dot{U}_2 、 \dot{I}_2 分别为末端电压和电流； Z_L 为末端负载阻抗。

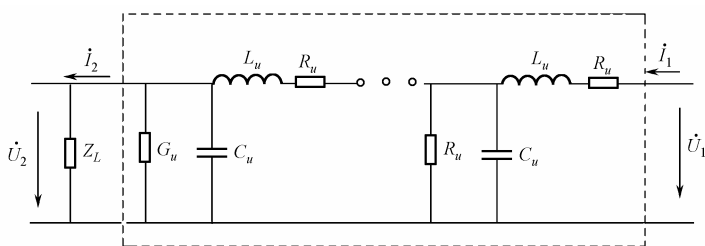


图 2-17 简单均匀传输线的分布参数模型

对于距离入端距离为 x 的点的电压 $\dot{U}(x)$ 、电流 $\dot{I}(x)$ ，满足关系

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}(x)}{dx} = -Z_u \dot{I}(x) \\ \frac{d\dot{I}(x)}{dx} = -Y_u \dot{U}(x) \end{cases} \quad (2-37)$$

式中： $Z_u = R_u + j\omega L_u$ ， $Y_u = G_u + j\omega C_u$ 。

进而，可推出 $\dot{U}(x)$ 、 $\dot{I}(x)$ 满足波动方程



$$\begin{cases} \frac{d^2 \dot{U}(x)}{dx^2} = Z_u Y_u \dot{U}(x) = \gamma^2 \dot{U}(x) \\ \frac{d^2 \dot{I}(x)}{dx^2} = Z_u Y_u \dot{I}(x) = \gamma^2 \dot{I}(x) \end{cases} \quad (2-38)$$

式中: $\gamma = \sqrt{Z_u Y_u} = \sqrt{(R_u + j\omega L_u)(G_u + j\omega C_u)}$ 称为均匀传输线的传播常数。

求解波动方程, 可得到入端和 x 点电压、电流之间的正弦稳态解:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma x) & Z_c \text{sh}(\gamma x) \\ \text{sh}(\gamma x)/Z_c & \text{ch}(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}(x) \\ \dot{I}(x) \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

式中: $Z_c = \frac{Z_u}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z_u}{Y_u}} = \sqrt{\frac{R_u + j\omega L_u}{G_u + j\omega C_u}}$ 称为均匀传输线路的波阻抗。

设均匀传输线长度为 l , 根据传输方程, 其入端和末端电压、电流满足

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma l) & Z_c \text{sh}(\gamma l) \\ \text{sh}(\gamma l)/Z_c & \text{ch}(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

考虑到末端(负荷)阻抗 $Z_L = \dot{U}_2 / \dot{I}_2$, 则入端阻抗可以表示为

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_c \frac{Z_L + Z_c \text{th}(\gamma l)}{Z_L \text{th}(\gamma l) + Z_c} \quad (2-41)$$

一段均匀传输线从两端看到的阻抗仅受负荷阻抗的影响。即在对端负荷阻抗相同的条件下, 两端的入端阻抗是完全相同的。

(2) 特征频段内故障 0 模网络模型

对故障分量 0 模网络中每条出线均采用分布参数模型, 同时由于负荷的 0 模阻抗为无穷大, 线路末端为开路状态。因此, 一个有 n 条出线的系统, 设故障点位于第 i 条出线, 0 模网络的故障模型可以表示为图 2-18 所示。图中: L_{0ku} 、 R_{0ku} 、 C_{0ku} 分别为第 k 条出线单位长度线路的 0 模电感、电阻、分布电容; D_k 为第 k 条出线检测点; $L_N = 3L_k$ 为消弧线圈 0 模等效电感; l_k 为出线 k 线路长



度。对中性点不接地系统开关 K_1 打开；对经消弧线圈接地系统开关 K_1 闭合。

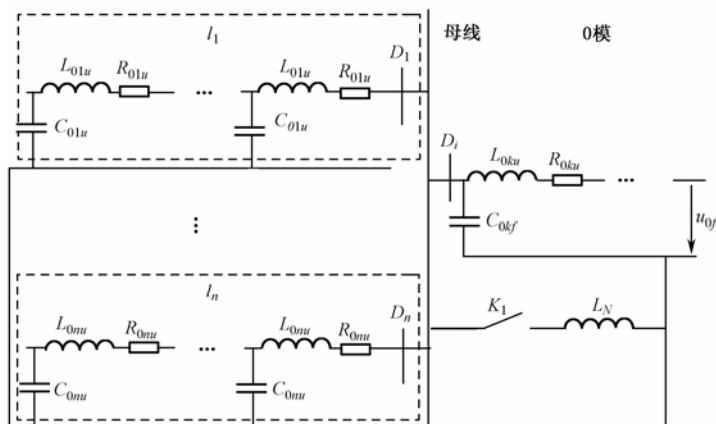


图 2-18 基于线路分布参数单相接地故障 0 模分量模型图

1) 中性点不接地系统

① 健全线路和故障点至负荷段线路

对于健全线路和故障线路故障点下游的检测点，从检测点向负荷方向看，相当于末端开路的均匀传输线。末端开路时 $Z_c = \infty$ ，则

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_c \operatorname{cth}(\gamma l) \\ &= \sqrt{\frac{R_u + j\omega L_u}{G_u + j\omega C_u}} \operatorname{cth}(l \sqrt{(R_u G_u - \omega^2 L_u C_u) + j\omega(R_u C_u + G_u L_u)}) \end{aligned} \quad (2-42)$$

由于 G_u 、 R_u 很小，可忽略

$$Z_1(\omega) = Z_c \operatorname{cth}(\gamma l) = -j \sqrt{\frac{L_u}{C_u}} \cot(\omega l \sqrt{L_u C_u}) \quad (2-43)$$

有



$k\pi < \omega l \sqrt{L_u C_u} < \frac{\pi}{2} + k\pi$ 时, $\arg(Z_1(\omega)) = -\frac{\pi}{2}$, 阻抗成容性

$k\pi + \frac{\pi}{2} < \omega l \sqrt{L_u C_u} < k\pi + \pi$ 时, $\arg(Z_1(\omega)) = \frac{\pi}{2}$, 阻抗成感性

第一次串连谐振 (第一次由容性变为感性) 频率:

$$\omega_{os} = \frac{\pi}{2l\sqrt{L_u C_u}}$$

在 $0 \sim \omega_{os}$ 频段内, 线路阻抗成容性, 根据

$$Z_1(\omega) = Z_c \operatorname{ch}(\gamma l) = -j \sqrt{\frac{L_u}{C_u}} \cot(\omega l \sqrt{L_u C_u}) = -j \frac{1}{\omega C'}$$

$$\omega_{os} = \frac{\pi}{2l\sqrt{L_u C_u}}$$

得
$$C'_0(\omega) = \frac{2\omega_{os} C_u l}{\pi \omega} \tan\left(\frac{\pi \omega}{2\omega_{os}}\right) \geq C_u l \quad (0 \leq \omega \leq \omega_{os}) \quad (2-44)$$

在 0 到 ω_{os} 低频段内, 阻抗呈容性, 且均匀传输线可以等效为一具有依频变化特性的集中参数电容。受线路电感影响, 等效电容大于实际分布电容 $C_u l$, 在 0 到 ω_{os} 频带内随频率单调递增。当频率接近 0 时, 等效电容趋于 $C_u l$; 当频率接近 ω_{os} 时, 等效电容将趋于无穷大, 如图 2-19 所示。

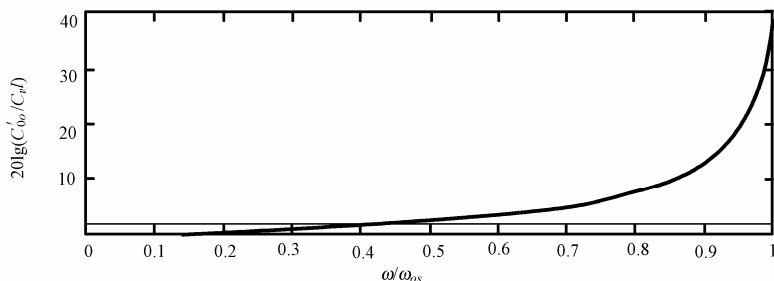


图 2-19 0 到 ω_{os} 频段内线路等效电容随频率变化示意图



② 故障点至母线段线路

故障线路故障点至母线段线路的输入阻抗可看做由所有健全线路输入阻抗的并联然后与故障点至母线段线路串联而成, 所有健全线路可以看做是该段线路的负荷。在所有健全线路第一次串联谐振频率之前, 所有健全线路成容性, 可等效为一集中参数电容, 因此故障点至母线段线路在所有健全线路第一次串联谐振频率之前可以看做是带有容性负荷的均匀传输线。

设线路末端带有纯电容负荷 C_2 , 则入端阻抗为

$$\begin{aligned}
 Z_{inC} &= j\sqrt{\frac{L_u}{C_u}} \frac{\sqrt{\frac{L_u}{C_u}} \tan(\omega\sqrt{L_u C_u} l) - \frac{1}{\omega C_2}}{\frac{\tan(\omega\sqrt{L_u C_u} l)}{\omega C_2} + \sqrt{\frac{L_u}{C_u}}} \\
 &= jZ_{cx} \frac{Z_{cx} \tan(\omega\sqrt{L_u C_u} l) - \frac{1}{\omega C_2}}{\frac{\tan(\omega\sqrt{L_u C_u} l)}{\omega C_2} + Z_{cx}}
 \end{aligned} \quad (2-45)$$

其首次谐振为串联谐振, 各个谐振频率之间不再等间隔。首次串联谐振频率 ω_{cs} 应满足关系:

$$Z_{cx} \tan(\omega_{cs} \sqrt{L_u C_u} l) = \frac{1}{\omega_{cs} C_2} \quad (2-46)$$

显然, $\omega_{cs} < \omega_{os}$, 在 $0 \sim \omega_{cs}$ 频段内所有健全线路成容性, 可等效为集中参数电容, 且在该频段内故障点至负荷段线路阻抗呈现纯容性, 可以等效为集中参数电容 C'_{oc} :

$$C'_{oc}(\omega) = \frac{\frac{\tan(\omega\sqrt{L_u C_u} l)}{\omega\sqrt{L_u C_u} l} C_u l + C_2}{1 - \omega C_2 Z_{cx} \tan(\omega\sqrt{L_u C_u} l)} \geq C'_{0o}(\omega) + C_2 \geq C_u l + C_2 \quad (2-47)$$



2) 消弧线圈接地系统

① 健全线路和故障线路故障点至负荷段线路

消弧线圈接地系统中,健全线路和故障点至负荷段线路的频率特性与中性点不接地系统中的健全线路和故障点至负荷段线路的频率特性完全一样,不受消弧线圈的影响。在第一次串联谐振频率之前,所有线路入端阻抗成容性,可以等效为一集中参数电容。

② 故障线路故障点至母线段线路

消弧线圈接地系统中,故障点至母线段线路的输入阻抗与中性点不接地系统不同,受消弧线圈的影响,在低频段线路阻抗成感性。当暂态信号频率大于三次谐波(150Hz)时,可以忽略消弧线圈的影响,即从三次谐波到第一次串联谐振频率之间输入阻抗仍然呈现容性,在该频段内故障点至母线段线路可以等效为集中参数电容。

图 2-20 所示为消弧线圈接地系统中不同检测点输入阻抗频率特性,曲线 1 为位于健全线路上的检测点检测到的输入阻抗频率特性曲线,曲线 2~5 为故障线路故障点至母线区段上,离母线距离由近到远分布的各检测点检测到的输入阻抗频率特性曲线。

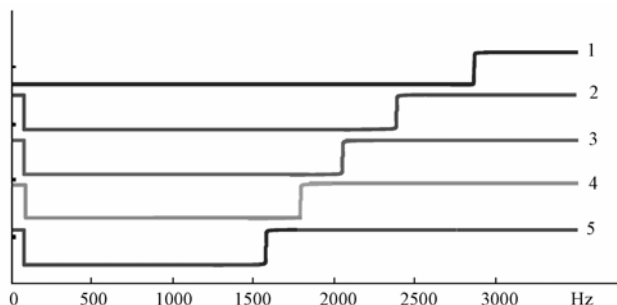


图 2-20 不同检测点输入阻抗频率特性

根据输入阻抗频率特性,选取沿线分布的所有检测点的输入阻抗均成容性的低频段作为特征频段(SFB)。该频段内,所有线



路可以等效为集中参数电容，并且该频段内保留了暂态信号的绝大部分能量，保证了检测的可靠性和灵敏度。

对于中性点不接地系统，SFB 频段可选为 0 到所有线路第一次串联谐振频率；对于消弧线圈接地系统，SFB 可选为从三次谐波（150Hz）到所有线路第一次串联谐振频率。为兼顾中性点不接地系统和消弧线圈接地系统，SFB 可选为从三次谐波到第一次串联谐振之间的频段。SFB 频段内 0 模网络等效电路如图 2-21 所示。

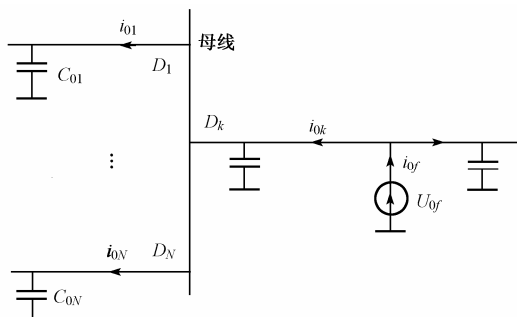


图 2-21 SFB 频段内 0 模网络等效图

2.6 本章小结

通过对零序电流的基波稳态特征、暂态特征和谐波特征的分析可知，从零序电流信号中提取基波稳态分量、基波有功分量、暂态分量和五次谐波分量作为故障特征，可以实现小电流接地系统单相接地故障选线。其中稳态零序电流幅值较小，暂态零序电流幅值较大，但是持续时间较短。在基于零序网络模型基础上，提出了由线模电感和 π 型电路组成的改进简化模型。在对暂态信号进行了频域分析的基础上，建立了特征频段内的 0 模网络模型，暂态信号可取为特征频段内信号。

第3章 基于故障暂态特征信息的 智能选线研究

小电流接地系统在发生单相接地故障时，稳态零序电流幅值较小，而暂态零序电流幅值较大，故基于暂态零序电流的故障选线方法更可靠。暂态零序电流信号是非平稳信号，而傅里叶变换对非平稳信号的处理能力较弱，小波分析则能较好地处理非平稳信号，故基于小波分析的故障选线方法越来越引起人们的重视。

在采样频率较低时，采样的暂态零序电流信号幅值会产生衰减，当故障线路的暂态零序电流信号幅值衰减严重时，利用小波包分析方法进行故障选线就会出现“误选”或“漏选”现象。本章对基于小波包分析的故障选线方法存在的缺陷进行了分析，提出了基于粗糙集理论和小波包分析的故障选线新方法。该方法首先利用粗糙集理论对采样的暂态零序电流信号进行增强处理，然后利用小波包选线方法进行选线。

3.1 基于小波包分析的故障选线方法分析

3.1.1 小波包基本理论

傅里叶(Fourier)分析这一数学工具为众多科学研究和开发做出了巨大贡献。但在解决实际工程问题中也发现了经典傅里叶分析的局限性，即在时空域中没有任何分辨率。为此，人们提出了时间局部化的“函数窗”(或称窗口傅里叶变换)，以使其具有时频分析能力，但它的时频窗是严格的，即不能同时在时域与频域



具有良好的局部化性质。

小波变换作为一种新兴的时频分析方法，一方面利用对信号的时域加窗变换消除了整周期采样限制，加之其频域紧支撑性保证了一定的带通滤波性能，因而能适应信号小范围波动。另一方面，小波变换特有的尺度伸缩功能使其具备了很强的奇异、突变信号鉴别能力，能有效地检测非平稳信号的瞬时、奇异成分，并显示其时域的产生和持续时间。小波变换的上述性质使其在设备状态监视与故障诊断等非平稳、时变信号的分析领域具有明显的优势，克服了传统傅里叶变换在暂态信号分析方面的不足，为分析暂态故障信号提供了新的途径，在电力系统中得到了广泛应用。

（1）小波理论的产生与发展

小波分析的思想可追溯到 1910 年 Haar 提出的小波规范正交基及 1938 年 Littlewood-Paley 对 Fourier 级数建立的 L-P 理论。但直接的研究则是 20 世纪 70 年代 Calderon 用其发现的再生公式给出抛物线空间的原子分解，此公式的离散形式已接近小波展开，只是无法组成一个正交基。1981 年 Stromberg 首先构造了第一个小波基，小波的真正形成则是 Grossman 和 Morlet 引入小波的概念应用于信号分析中的信号分解，紧接着，Meyer 于 1986 年创造性地构建出了具有一定衰减性的光滑小波，Daubechies、Grosses、Meyer 和 Quake 等发展了框架理论。随之，Battle 构建了具有指数衰减的小波函数。1987 年，Mallat 提出了多尺度分析的概念，从而统一了以前具体小波的构造，同时也提出了小波变换的快速算法——Mallat 算法。此后，小波得到了更多专家和学者的重视，1988 年 Daubechies 给出了具有紧支集的正交小波，1989 年 Coifman、Meyer 和 Quake 等引入了小波包，1990 年崔锦泰和王建忠构建了具有紧支撑的单正交小波。1991 年，Wicherhanser 等人将 Mallat 算法进一步深化，提出了小波包算法。至此，小波的系统理论已基本形成。



(2) 小波分析简介

小波分析方法是一种窗口大小（即窗口面积）固定但其形状可以改变，时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法。即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。

设 $\psi(t) \in L^2(R)$ （ $L^2(R)$ 表示平方可积的实数空间，即能量有限的信号空间），其傅里叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$ 。当 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足允许条件（Admissible Condition）

$$C_{\psi} = \int_{\rho} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3-1)$$

时，称 $\psi(t)$ 为一个基小波或母小波（Mother Wavelet）。将母函数 $\psi(t)$ 经伸缩和平移后，就可以得到一个小波序列。

对于连续的情况，小波序列为

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (3-2)$$

式中： a 为尺度参数， b 为平移参数。

对于离散的情况，连续小波的离散化，即对尺度参数 a 和平移参数 b 的离散化，分别取作 $a = a_0^j$ ， $b = ka_0^j b_0$ ，这里 $j \in Z$ ，扩展步长 $a_0 \neq 0$ 是固定值，为方便起见，总是假定 $a_0 > 1$ 。所以对应的离散小波函数 $\psi_{j,k}(t)$ 即可写作

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (3-3)$$

对于任意的函数 $f(t) \in L^2(R)$ ，积分小波变换定义为

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3-4)$$

其逆变换为



$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{R^+} \int_R \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (3-5)$$

(3) 小波包变换

Mallat 和 Meyer 等人从不同尺度间信息量表示方法出发,运用多分辨分析思想并结合数字滤波理论,提出了正交小波变换的一种塔式结构快速算法,称为 Mallat 算法。Mallat 分解算法可表示为图 3-1。认为原始序列 f 包含信号的全部信息, h 、 g 分别为高通和低通数字滤波器, f 经 h 、 g 滤波后分别得到高频细节系数 $d1$ 和低频逼近系数 $a1$, 二进抽取后对 $a1$ 再经 h 、 g 滤波得到下一尺度的细节系数 $d2$ 和逼近系数 $a2$ 。这种算法可根据需要依次进行。

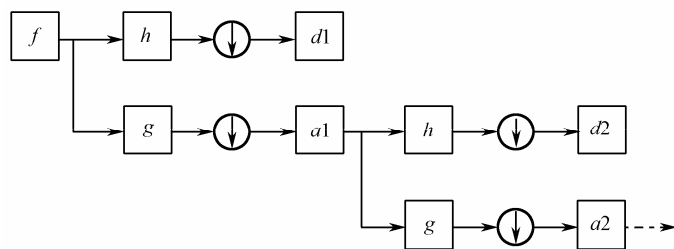


图 3-1 Mallat 算法示意图

小波包分析 (Wavelet Packet Analysis) 为信号提供了一种更加精细的分析方法,它将频带进行多层次划分,对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解,并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时频分辨率,因此小波包分析具有更广泛的应用价值。小波包分解树结构如图 3-2 所示。

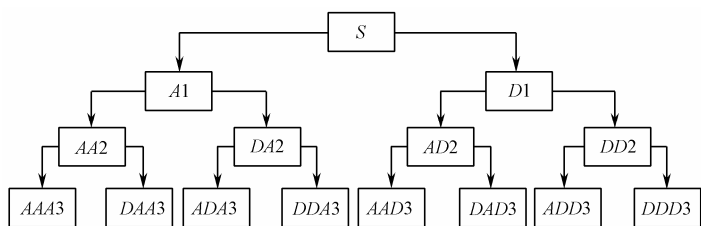


图 3-2 小波包分解树结构示意图

图 3-2 中, A 表示低频, D 表示高频, 末尾的序号数表示小波包分解的层次 (即尺度数)。分解具有关系:

$$S = AAA3 + DAA3 + ADA3 + DDA3 + AAD3 + DAD3 + ADD3 + DDD3 \quad (3-6)$$

定义子空间 U_j^n 是函数 $u_n(t)$ 的闭包空间, 而 U_j^{2n} 是函数 $u_{2n}(t)$ 的闭空间, 并令 $u_n(t)$ 满足下面的双尺度方程:

$$\left. \begin{aligned} u_{2n}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) u_n(2t - k) \\ u_{2n+1}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) u_n(2t - k) \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

式中: $g(k) = (-1)^k h(1-k)$, 即两系数也具有正交关系。当 $n=0$ 时, 上式表述为

$$\left. \begin{aligned} u_0(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) u_0(2t - k) \\ u_1(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) u_0(2t - k) \end{aligned} \right\} \quad (3-8)$$

对于 $n \in \mathbb{Z}_+$ 的情况, 可推广得出 $U_{j+1}^n = U_j^{2n} \oplus U_j^{2n+1}$, $j \in \mathbb{Z}$, $n \in \mathbb{Z}_+$ 。

构建出的序列 $\{u_n(t)\}$ (其中 $n \in \mathbb{Z}_+$) 称为由基函数 $u_0(t) = \phi(t)$ 确定的正交小波包。由于 $\phi(t)$ 由 h_k 唯一确定, 所以又称 $\{u_n(t)\}$ (其中 $n \in \mathbb{Z}_+$) 为关于序列 $\{h_k\}$ 的正交小波包。



考虑空间分解: $U_{j+1}^n = U_j^{2n} \oplus U_j^{2n+1}, j \in Z$, 设 $g_j^n(x) \in U_j^n$, 且 $g_{j+1}^n(x) = g_j^{2n}(x) + g_j^{2n+1}$ 。令 $g_j^k(x) = \sum_l d_l^{j,k} \psi_k(2^j x - l)$, 则分解算法为

$$\begin{cases} d_l^{j,2n} = \sum_k a_{k-2l} d_l^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} = \sum_k b_{k-2l} d_l^{j+1,n} \end{cases} \quad (3-9)$$

式中: a_{k-2l} 、 b_{k-2l} 为多尺度分析分解序列。

随着尺度 j 的增大, 相应正交小波基函数的空间分解率越高, 而其频率分辨率越低, 这正是正交小波基的一大缺陷, 而小波包却具有随 j 增大而变宽的频谱窗口进一步分割变细的优良性质, 从而克服了正交小波变换的不足。小波包可以对 W_j 进一步分解, 从而提高频率分辨率, 是一种比多分辨分析更加精细的分解方法, 具有更好的时频特性。

3.1.2 基于小波包分析的故障选线方法原理

(1) 小波包基函数选取

标准傅里叶变换的基函数是唯一的, 小波变换则不同, 小波函数可以有多种选择, 变换方式具有多种形式, 而且采用不同的小波基对同一问题的分析结果可能相差悬殊。小波分析的这种特点, 一方面为针对不同问题选择不同小波提供了灵活性, 另一方面也增加了应用小波处理问题的多样性和主观性。所以小波分析在工程应用中, 一个非常关键的问题就是如何选择最佳小波函数。面对一个具体应用, 怎样选择恰当的小波是当前小波分析研究的重要内容之一。对于小波的应用来说, 需要把握小波函数的下列性质: 正交性、支集长度、光滑性、对称性以及消失矩特性等。

小波的每一种特性在处理问题中都发挥着特有的作用。但是这些特性之间又是存在矛盾的。事实上构建一个即具有正交性,



又具有紧支集、平滑性甚至对称性的小波函数是难以做到的。Daubechies 首先证明了,当由一个多分辨率分析所决定的尺度函数和小波函数都是实函数且都有紧支集时,小波函数和尺度函数都不再具备对称性或反对称性(Haar 小波除外)。其次,紧支集小波的光滑性也较差。如上所述,光滑性与频域局部性是一致的,而海森堡测不准原理说明,频域局部性变好,必然要增大时域支集的长度。对于正交小波,光滑性与衰减性也是一对矛盾的特性,一个无穷阶光滑并具有指数衰减的正交小波是不存在的。

Daubechies 小波系(简称 DBN,其中 N 为小波序号)是工程上应用最广泛、最成熟的正交实小波函数族,它们都具有有限支集。DB 小波除了具有正交小波的一般性质外,在多分辨率分析(MRA)中 DB 小波构成的是一个共轭正交滤波器系统(CQF)。利用共轭正交滤波器的能量无损性和功率互补性。能量无损性是指通过滤波器后信号的能量没有损失,保持不变,即其输入信号 $x(n)$ 和输出信号 $y(n)$ 满足下列方程:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \sum_n x^T(n)x(n) = \sum_{i=1}^p \left[\sum_n x_i^2(n) \right] \\ \varepsilon_y = \sum_n y^T(n)y(n) = \sum_{i=1}^p \left[\sum_n y_i^2(n) \right] \end{cases} \quad (3-10)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y \quad (3-11)$$

功率互补性是指尽管每个通道的频率特性不是全通的,也不是理想带通的,但各个通道合在一起却具有全通特性。同时,正交小波变换属于线性变换,所以,我们能够利用小波包分解后的频带来分析原始信号的频率分布,提取零序电流暂态信号的特征。

DBN 小波系的特点是随着序号 N 的增加,时域支撑长度变长,时间局部性变差;滤波器长度变长;消失矩阶数增加;正则性增加,频域局部性变好。在利用小波包从暂态信号中提取故障特征时,对时间局部性要求不是很严格,而对频域局部性要求较高,



以防止频率混叠，因而滤波器长度不能太短，否则灵敏度不高，甚至可能误判；但如果序号 N 较大，会增加计算量，使计算速度变慢。综合以上各种因素，决定采用 DB4 小波。小波包对暂态信号的分解层数也应选择适当，层数过多则频宽过小，频宽对应的采样点过少，从而使判据灵敏度降低。而分解层数过少则频宽过大会造成信息量增大，可能引入更多的干扰成分，降低判据可靠性。因此选择分解层数为 4。

(2) 基于小波包的故障选线判据

当配电网发生单相接地故障时，利用 DB4 小波包将流经各线路的暂态零序电流按一定频带宽度进行分解后，可得到线路的零序电流在各个频段下的信号。在剔除低频段信号（由于补偿电流对低频段信号的影响较大，并且暂态电容电流的频率分布多集中在高频段）后，对剩余频段下的信号按式 (3-12) 来确定能量最大的频段。

$$\varepsilon = \sum_n \left[\omega_k^j(n) \right]^2 \quad (3-12)$$

式中： $\omega_k^j(n)$ 为小波包分解第 (j, k) 子频段下的系数。

能量最大的频段就是该线路暂态电容电流分布最集中的频段，也就是故障特征最明显的特征频段。但是，由于暂态电容电流的能量不一定集中在某一个频段，有可能集中在几个频段，所以将线路在能量较集中的几个频段的总能量定义为式 (3-13)。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\omega_{l_i}^{k_i}(j) \right]^2 \quad (3-13)$$

式中： $\omega_{l_i}^{k_i}(j)$ 为小波包分解在第 (k_i, l_i) 子频段下的系数； m 为能量较集中的频带个数。

比较各线路在各自特征频段的能量，能量越大越可能是故障线路。选出能量较大的 3 条线路，再比较它们的极性，极性与其他线路相反的判断为故障线路，如果极性相同，则判断为母线故障。



3.1.3 基于小波包分析的故障选线方法存在的问题

小波包选线方法虽然是一种较理想的故障选线方法，但是实际采集的暂态零序电流信号，由于采样频率的限制，有些故障信息可能丢失，致使故障线路的特征不明显，造成“误选”或“漏选”。下面对小波包选线方法存在的问题进行分析。

(1) 仿真模型

为了利用仿真软件 EMTP-ATP 对小波包选线方法进行分析，首先要建立小电流接地系统的仿真模型，系统的仿真模型如图 3-3 所示。该系统为一个有 6 条线路的 110kV/10kV 变电所，变压器为 Y/Y₀ 形接线，低压侧中性点通过消弧线圈串联电阻接地。线路的正序阻抗为 $Z_1=(0.17+j0.38)\Omega/\text{km}$ ，正序对地导纳为 $b_1=j3.045\mu\text{s}/\text{km}$ ，零序阻抗为 $Z_0=(0.23+j1.72)\Omega/\text{km}$ ，零序对地导纳为 $b_0=j1.884\mu\text{s}/\text{km}$ ，线路长度为 $L_1=3\text{km}$ ， $L_2=6\text{km}$ ， $L_3=9\text{km}$ ， $L_4=12\text{km}$ ， $L_5=15\text{km}$ ， $L_6=20\text{km}$ 。线路的等效负荷统一采用 $Z_L=(400+j20)\Omega$ 。根据线路参数计算出消弧线圈电感为 $L_N=8.02\text{H}$ 。

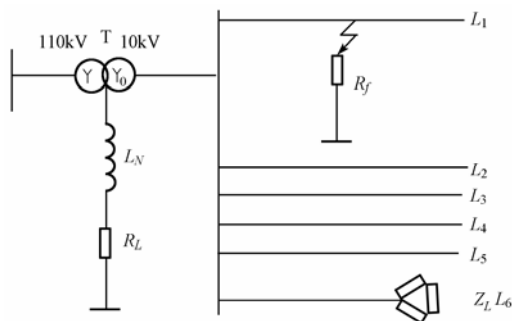


图 3-3 系统仿真模型



(2) 存在的问题

假设在相电压相位为 90° 时, L_1 在 10% 处出现接地电阻为 50Ω 单相接地故障。考虑到暂态电容电流自由振荡的频率一般集中在 $300\sim 3000\text{Hz}$, 采用 3.2kHz 的采样频率对零序电流信号进行采样, 采样数据窗长取故障前 $\frac{1}{4}$ 周波和故障后 $1\frac{3}{4}$ 周波, L_1 和 L_6 的原始暂态零序电流故障后的 $\frac{1}{8}$ 周波信号和对应采样点如图 3-4 (a)、图 3-4 (b) 所示, 采样前和采样后的暂态零序电流信号分别如图 3-5 (a)、图 3-5 (b) 和图 3-5 (c)、图 3-5 (d) 所示。由图可知, 采样后的信号都发生了不同程度的信号衰减, 尤其是故障线路。利用 DB4 小波分别对采样后的暂态零序电流信号进行 4 层小波包分解, 选线频带宽度为 200Hz 。根据式 (3-13) 计算线路在各自能量较集中的频段的总能量, 计算结果如表 3-1 所示。其中, ε_k 为线路 L_k 的总能量, ε_T 为所有线路的总能量。由表 3-1 可知, L_1 的能量在所有线路总能量中占的比重较小, 所以判断为非故障线路, 从而出现“漏选”现象。选出能量较大的 L_4 、 L_5 和 L_6 , 然后比较它们的极性, 比较后可知它们的极性相同, 所以判断为母线故障, 出现“误选”现象。

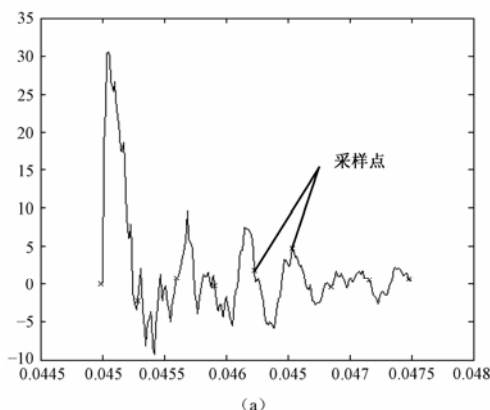


图 3-4 零序电流信号和对应采样点

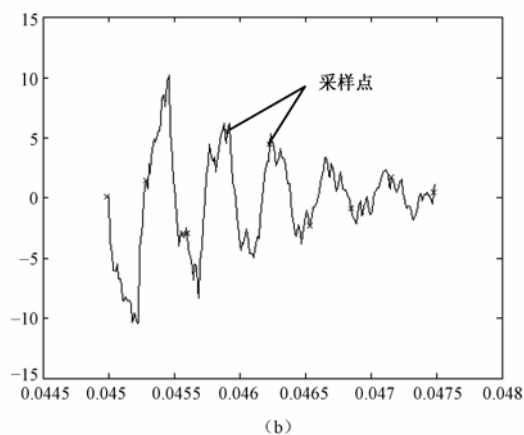


图 3-4 零序电流信号和对应采样点（续）

表3-1 小波包方法处理结果

线路	原 始 信 号			采样后信号			线路
	ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_S$	选线结果	ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_S$	选线结果	状态
L_1	1824.2	0.52	故障	16.3908	0.1	正常	故障
L_2	81.865	0.02	正常	12.4109	0.07	正常	正常
L_3	165.2236	0.05	正常	24.5036	0.15	正常	正常
L_4	368.7476	0.1	正常	30.5888	0.18	正常	正常
L_5	439.0385	0.12	正常	32.71	0.2	正常	正常
L_6	660.8249	0.19	正常	50.7342	0.3	正常	正常

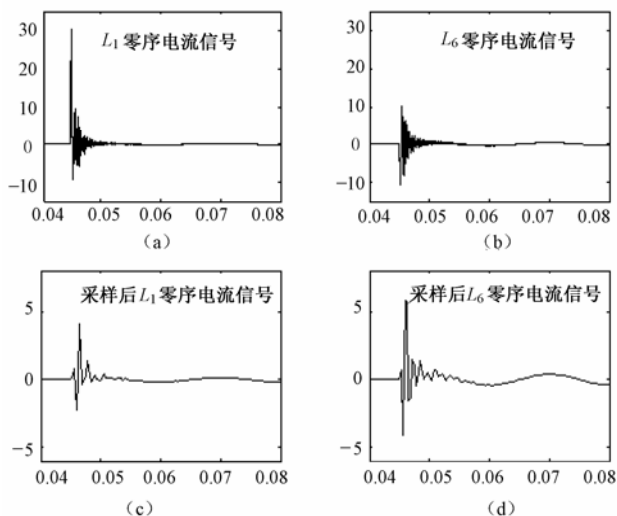


图 3-5 采样前后的暂态零序电流信号

3.2 基于粗糙集的信号增强理论

3.2.1 暂态零序电流信号的增强

基于小波包分析的故障选线方法之所以出现了错误的选线结果，是因为暂态零序电流信号在低频采样后发生了衰减，因而需要对采样后的信号进行增强处理。信号衰减的越严重，需要增强的比例就越大。

利用高速采集电路对零序电流信号进行高速采样，采样后的信号接近实际信号。高速采样信号最大值和低速采样信号最大值的差值越大，说明信号衰减越严重，信号需要增强的比例就越大。一条线路的高速采样信号首波头极性和其他多数线路的极性相反，说明该线路可能是故障线路，信号需要增强的比例大。但考



虑到由于干扰等因素的存在可能会出现检测首波头极性错误的现象,因此,当检测到某线路首波头极性和其他线路相反时信号增强的比例不能太大。如果增强的比例太大,当首波头极性检测错误时,有可能使增强后非故障线路零序电流信号的能量比故障线路的零序电流信号的能量还大,造成选线错误。鉴于以上原因,根据下式对低频采样的信号做增强处理:

$$i_{eh}^l = (1 + d \cdot \frac{i_{\max}^h - i_{\max}^l}{2i_{\max}^h}) \cdot i_s^l \quad (3-14)$$

式中: i_{eh}^l 为增强后低频采样零序电流信号的瞬时值, i_{\max}^h 为高频采样信号的最大值, i_{\max}^l 为低频采样信号的最大值, i_s^l 为增强前低频采样信号的瞬时值, d 为信号增强的比例系数。

由于没有已有的规则确定信号增强的比例系数 d , 所以本文采用具有数据挖掘能力的粗糙集理论寻找确定信号增强比例系数 d 的规则。应用粗糙集理论对暂态零序电流信号的各种故障特征信息进行数据挖掘和知识发现, 最终确定采样后暂态零序电流信号需要增强的比例系数。该方法以决策表为主要工具, 通过对样本的各种故障特征进行离散化处理, 对冗余信息进行知识约简, 最终获得故障特征信息与信号增强比例系数之间的决策规则。

3.2.2 粗糙集基本理论

粗糙集 (Rough Set, 简称 RS) 理论是表示不完整性和不精确性的有力数学工具, 能有效分析不精确、不一致、不完整等不完备数据, 它不需要附加的先验知识, 就可以对数据进行分析 and 推理, 并得出能用自然语言表示的潜在知识或规律。

(1) 粗糙集理论的基本定义

粗糙集理论是由波兰学者 Z. Pawlak 于 1982 年提出的。粗糙集理论认为, 知识是将对象进行分类的能力。如果我们对论域中



的元素（对象）具备了必要的知识或信息，通过这些知识能够将论域中的元素划分为不同的类别，每个类别就是一个概念。若两个元素具有相同的知识，则它们就是不可区分的，即根据现有的知识不能够将它们区分开。不可区分关系是粗糙集理论的最基本概念，在此基础上引入成员关系、上近似和下近似等概念来刻画不精确性和模糊性。知识的粒度性是造成使用已有知识不能精确地表示某些概念的原因。这就产生了关于不精确的边界的思想。RS 理论的模糊性是一种基于边界的概念，即一个模糊的概念具有模糊的不可被明确划分的边界。为刻画模糊性，每个不精确概念由一对精确概念来表示，分别称为下近似与上近似。上近似与下近似的差就是此概念的边界区域，它由不能肯定分类到概念上或其补集上的所有元素构成。若边界非空，则概念就是模糊概念。这样，模糊性与不确定性有了联系，即模糊性是由不确定性来定义的。这些是粗糙集理论的基本思想。该理论是数据挖掘的重要方法，具有很强的实用性，已经在近似推理、决策支持、机器学习和模式识别等许多科学与工程领域中得到了成功应用。

（2）知识表达与粗糙集

作为研究对象的非空集合 U 称为论域，论域的一个等价关系可以将论域划分为几个不相关的子集，划分方法的集合称为 U 上的知识库。对于论域 U 的一个等价关系 R ，在该分类下的一个子集 X 相当于一个等价类，用 $[X]_R$ 表示，等价类族用 U/R 表示。

一个知识库表示为 $K=(U, R)$ ，其中 U 为论域， R 是 U 上的等价关系。设 $P \subseteq R$ ，且 $P \neq \Phi$ ，则 $\cap P$ （ P 中所有等价关系的交集）也是一个等价关系，称为 P 上的不可分辨关系，记作 $\text{ind}(P)$ ，用 $U/\text{ind}(P)$ 表示等价关系 $\text{ind}(P)$ 的所有等价类族。 $\text{ind}(P)$ 的等价类称为基本集，即

$$[X]_{\text{ind}(P)} = \cap [X]_P \quad (3-15)$$

设 X 是 U 中的一个子集，如果 X 不能用基本集的并集准确地



表示出来, 则称 X 为粗糙集。设 R 为一个等价关系, 可以根据知识 R 用两个子集来描述粗糙集 X , 下列两个集合

$$\begin{aligned} R_-(X) &= \cup \{Y \in U \mid \text{ind}(R): Y \subseteq X\} \\ R^-(X) &= \cup \{Y \in U \mid \text{ind}(R): Y \cap X \neq \emptyset\} \end{aligned} \quad (3-16)$$

分别称它们为 X 的 R 下近似与 R 上近似。下近似也称为正域 $POS_R(X)$:

$$POS_R(X) = R_-(X) \quad (3-17)$$

并进一步定义负域 $NEG_R(X)$ 和边界域 $BN_R(X)$:

$$NEG_R(X) = U - R^-(X) \quad (3-18)$$

$$BN_R(X) = R^-(X) - R_-(X) \quad (3-19)$$

下近似由知识 R 的所有等价类中一定能划入 X 的等价类的元素组成; 上近似由 R 的等价类中与 X 有公共元素的等价类的元素组成。下近似表示由知识 R 对 X 可精确划分的元素最大集合, 负域表示根据知识 R 能精确地划分到 X 补集上的元素集合, 上近似表示含有 X 的 R 最小可定义集。

(3) 决策表及简化

决策表是一类特殊而重要的知识表达系统, 用于分析决策问题。决策表是一张二维表格, 每一行表示一条决策规则。决策表的列表属性, 一个属性对应一个等价关系, 这样一个表可以看做是等价关系族, 即知识库。决策表的属性分为两种: 条件属性和决策属性, 两种属性的等价类分别为条件类和决策类。

我们的目的是从包含大量样本数据的决策表中总结出一般性规律, 粗糙集理论通过决策表的简化实现规则约简。决策表的简化就是对决策表中的条件属性和范畴进行简化, 简化后的决策表具有简化前的决策表的功能, 但简化后的决策表具有更少的条件属性, 即同样的决策可以基于更少量的条件。决策表简化过程包括知识的简化和范畴的简化两方面, 这是粗糙集理论的核心内容, 下面介绍相关概念。



1) 知识的简化

令 R 为一等价关系族, $r \in R$, 当 $\text{ind}(R) = \text{ind}(R - \{r\})$, 称 r 为 R 中可省略的; 否则, r 为 R 中不可省略的。

当对于任一 $r \in R$ 均为 R 中不可省略的, 则族 R 为独立的。

令 $Q \subseteq P \subseteq R$, 当 Q 独立, 且 $\text{ind}(Q) = \text{ind}(P)$, 称 Q 为 P 的简化, 记作 $\text{red}(P)$ 。

P 中所有不可省略关系的集合称为 P 的核, 记作 $\text{core}(P)$ 。 P 的核为 P 中所有简化的交集, $\text{core}(P) = \cap \text{red}(P)$ 。

2) 知识的相对简化

令 P 和 S 为 U 中的等价关系, S 的 P 正域 (记作 $\text{POS}_P(S)$) 定义为:

$$\text{POS}_P(S) = \cup_{X \in U} \{X \mid S\} \quad (3-20)$$

对于 $U \mid P$ 的分类, $U \mid S$ 的正域是论域中所有通过分类 $U \mid P$ 表达的知识能够确定地划入 $U \mid S$ 类的对象的集合。

若 $P - \{r\}$ 不改变 S 的 P 正域, 称 r 为 P 中 S 可省略的; 否则, r 为 P 中 S 不可省略的。

P 中所有 S 不可省略关系族称为 P 的 S 核, 记为 $\text{core}_S(P)$ 。

3) 范畴的简化

令 $F = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 为一集合族, $X_j \subseteq U$ 。当 $\cap(F - \{X_i\}) = \cap F$, 称 X_i 为 F 中可省略的; 反之 X_i 为 F 中不可省略的。若 $G \subseteq F$ 中所有分量都不可省略, G 为独立的; 否则 G 是依赖的。若 G 是独立的, 且 $\cap G = \cap F$, 则 G 是 F 的简化。 F 中所有不可省略集族称为 F 的核。

这里 $\cap F$ 表示集合族 F 中所有集合交集的元素构成的集合。

4) 范畴的相对简化

令子集 $Y \subseteq U$, 使得 $\cap F \subseteq Y$, 当 $\cap(F - \{X_i\}) \subseteq Y$, 称 X_i 为 F 中 Y 可省略的; 反之, X_i 为 F 中不可省略的。若 $G \subseteq F$ 中所有分量都为 Y 不可省略的, 则 G 为 Y 独立的; 反之, G 为 Y 依赖的。



当 G 是 Y 独立的, 且 $\cap G \subseteq Y$, 则 G 是 F 的 Y 简化。 F 中所有 Y 不可省略集族称为 F 的 Y 核。

知识的简化和范畴的简化是粗糙集理论应用的基础。

3.2.3 基于粗糙集的信号增强信息系统

假设基于粗糙集理论的信号增强信息系统为 $K=(U, A)$, 论域 U 是线路的零序电流信号的集合, A 是由线路零序电流的故障特征和采样信号增强比例系数组成的属性集, V_a 为每个属性 $a \in A$ 的属性值域。

定义 3-1 (不可分辨关系) 给定信号增强信息系统 $K=(U, A)$, 对于每个子集 $B \subseteq A$ 定义一个等价关系 $\text{ind}(B)$, 称做不可分辨关系:

$$\text{ind}(B) = \{(x, y) \in U^2 : \forall a \in B (a(x) = a(y))\} \quad (3-21)$$

$[x]_B$ 表示对象 $x \in U$ 关于 B 的等价类。

定义 3-2 (上近似、下近似和边界) 给定信号增强信息系统 $K=(U, A)$, $X \subseteq U$ 是一个对象的集合, $B \subseteq A$ 是属性的集合, 则 B_- 下近似、 B^- 上近似和 B_{NB} 边界为

$$\begin{cases} B_-(X) = \{x \in U : [x]_B \subseteq X\} \\ B^-(X) = \{x \in U : [x]_B \cap X \neq \Phi\} \\ B_{NB}(X) = B^-(X) - B_-(X) \end{cases} \quad (3-22)$$

为了利用粗糙集理论实现信号的增强, 现定义以下规则:

规则 3-1 给定信号增强信息系统 $K=(U, A)$, $A=C \cup D$, 条件属性集定义为 $C=\{a, b, c\}$, 其中 a 表示暂态零序电流采样前后最大幅值的衰减比例, b 表示暂态零序电流信号第一个波头的极性, c 表示暂态零序电流的有效值; 决策属性集定义为 $D=\{d\}$, 其中 d 表示零序电流信号需要增强的比例系数。

规则 3-2 给定信号增强信息系统 $K=(U, A)$, 条件属性 $C=\{a, b, c\}$, 规定



$$a = \frac{i_{\max}^h - i_{\max}^l}{i_{\max}^h} \quad (3-23)$$

式中: i_{\max}^h 为采样前零序电流的最大幅值; i_{\max}^l 为采样后零序电流的最大幅值。

规则 3-3 给定信号增强信息系统 $K=(U, A)$, 条件属性 $C=\{a, b, c\}$, 规定 b 为线路零序电流信号第一个波头的极性与其他多数线路的极性是相同还是相反。

规则 3-4 给定信号增强信息系统 $K=(U, A)$, 条件属性 $C=\{a, b, c\}$, 规定 c 为零序电流信号有效值。

规则 3-5 给定信号增强信息系统 $K=(U, A)$, 决策属性 $D=\{d\}$, 规定 d 表示零序电流信号增强的比例系数。

3.3 基于粗糙集信号增强的智能选线实现

3.3.1 基于粗糙集的信号增强

(1) 获取原始数据表

利用图 3-3 的仿真模型, 分别在每条线路的 10%、50% 和 90% 处和电压相位为 0° 、 45° 、 90° 时通过 5Ω 、 50Ω 、 500Ω 、 $2k\Omega$ 的过渡电阻接地, 利用 EMTP-ATP 仿真软件仿真后, 根据规则 3-2、规则 3-3 和规则 3-4 提取故障特征。若一条线路零序电流信号第一波头的极性与其他多数线路的极性相反, 说明该线路有可能为故障线路, 信号增强的比例系数大; 反之为非故障线路, 信号增强的比例系数小。另外, 采样后信号的最大值衰减越大, 信号增强的比例系数越大。根据专家经验和试验确定决策属性值。随机选取 200 个零序电流信号的故障特征作为样本构成原始数据表, 如表 3-2 所示。



(2) 设计决策表

根据等频率划分的离散化方法，将各条件属性和决策属性按以下方式进行编码： a 属性值表示范围：1 表示 0~30%，2 表示 30%~50%，3 表示 50%~100%； b 属性值表示范围：1 表示极性相反，0 表示极性相同； c 属性值表示范围：1 表示小于 0.1，2 表示大于 0.1 且小于 0.5，3 表示大于 0.5； d 属性值表示范围：1 表示 1，2 表示 2，3 表示 3，4 表示 4。因此由原始数据表得到知识系统 $K=(U, A)$ 的决策表，如表 3-3 所示。

(3) 简化决策表

首先合并决策表中的重复信息，然后分别进行属性简约和值简约，得到最小决策算法为

$$\begin{cases} a_1b_0 \vee a_2b_0 \rightarrow d_1 \\ a_3b_0 \vee a_1b_1 \rightarrow d_2 \\ a_2b_1 \rightarrow d_3 \\ a_3b_1 \rightarrow d_4 \end{cases} \quad (3-24)$$

表3-2 原始数据表

零序电流信号编号	幅 值 衰 减	极 性	有 效 值	增 强 比 例
1	0.3726	反	0.737	3
2	0.0797	同	0.505	1
3	0.8648	反	0.08	4
4	0.5094	同	0.059	2
5	0.3526	同	0.093	1
6	0.1939	反	0.16	2
7	0.2152	反	0.17	2
...
194	0.5188	同	0.016	2
195	0.7282	同	0.027	2



续表

零序电流信号编号	幅 值 衰 减	极 性	有 效 值	增 强 比 例
196	0.8945	反	0.102	4
197	0.2067	同	0.041	1
198	0.4588	反	0.067	3
199	0.4505	同	0.014	1
200	0.1686	同	0.016	1

表3-3 决策表

U	a	b	c	d
1	2	1	3	3
2	1	0	3	1
3	3	1	1	4
4	3	0	1	2
5	2	0	1	1
6	1	1	2	2
7	1	1	2	2
...
194	3	0	1	2
195	3	0	1	2
196	3	1	1	4
197	1	0	1	1
198	2	1	1	3
199	2	0	1	1
200	1	0	1	1

(4) 信号增强

利用高速采集电路对暂态零序电流信号进行高速采样，采样



后的信号接近实际信号。高速采样的信号通过 A/D 转换后存入循环存储器中，CPU 通过应答方式从循环存储器中获得暂态零序电流信号的前四分之一周波数据，CPU 对该数据分析后即可得到暂态零序电流信号的最大值和首波头极性。根据规则 3-2 和规则 3-3 分别得到属性 a 和 b 的属性值。再利用最小决策算法 (3-24) 可得到决策属性值，即采样后零序电流信号的增强比例系数。然后，根据公式 (3-14) 对低频采样信号进行增强处理。

3.3.2 故障选线实现

利用 DB4 小波包对经过粗糙集理论增强的暂态零序电流信号进行 4 层小波包分解，根据公式 (3-13) 计算每条线路在各自特征频段的总能量，能量明显大于其他线路的判断为故障线路；若没有一条线路的能量明显大于其他线路，则判断为母线故障。按以下规则进行故障判定：

规则 3-6 若线路 L_k 的能量在所有线路的总能量中所占的比重 $\varepsilon_k / \varepsilon_{\Sigma} \geq 35\%$ ，则判断线路 L_k 为故障线路。

规则 3-7 若每条线路的能量在所有线路的总能量中所占的比重均为 $\varepsilon_k / \varepsilon_{\Sigma} < 35\%$ ，则判断为母线故障。

利用仿真数据对该选线方法进行验证，验证过程见 5.2 节。验证结果表明，该选线方法的选线精度高于基于小波包分析的故障选线方法。

3.4 本章小结

通过对基于故障暂态特征的小波包选线方法的分析，发现在采样频率较低时，暂态零序电流信号会发生不同程度的衰减，有时会出现严重衰减。当故障线路的暂态零序电流的采样信号发生严重衰减时，利用小波包分析选线方法进行选线时可能出现“误



选”或“漏选”现象。针对这一问题，提出了基于粗糙集理论和小波包分析的故障选线新方法。该方法根据暂态零序电流采样前后的幅值衰减比和首波头极性，利用粗糙集理论得到零序电流信号需要增强的比例系数，根据信号增强的比例系数对低频采样的暂态零序电流信号进行增强预处理，然后对增强的暂态零序电流信号进行小波包分解，根据能量最大的原则实现故障选线。

第4章 基于故障暂态和稳态特征 信息的融合选线研究

虽然基于故障暂态特征信息的选线方法具有较高的选线准确度，但是当故障发生在相电压相位为零时或高电阻接地故障时，暂态故障特征不明显，选线准确度降低。为了提高选线的准确度，本章把智能信息融合技术应用于小电流接地故障选线，融合故障时暂态和稳态的各种故障信息，综合各种故障选线方法，从而提高选线的准确度和可靠性。

本章首先根据各种故障特征的特点定义了各自的故障测度，将各种故障特征的故障测度利用粗糙集理论进行融合，提出了基于粗糙集理论的融合选线方法。针对基于粗糙集理论的融合选线方法选线准确度较低的问题，提出了选线准确度更高的基于神经网络的融合选线方法。针对神经网络训练速度较慢的缺点，提出了基于粗糙集理论的样本归一化方法。并将该归一化方法应用于基于神经网络的融合选线中。

4.1 问题的提出

长期以来，小电流接地系统单相接地故障选线是国内外关注的尚未解决的一大难题。国内科研院所、继电保护制造厂家先后提出了多种故障选线方法。国外（如俄罗斯、法国、德国、丹麦等）专门成立研究小组，进行小电流接地系统接地保护的研究。现有的各种故障选线方法通常利用不同的故障信息进行故障选线，所适用的范围不同，检测的鲁棒性和精度不一样。在现场运



行中，单一的故障选线方法故障检测准确度较低，根本原因在于：

1) 小电流接地系统零序阻抗大，并受故障接地过渡阻抗的影响，故障电流小，故障线路与非故障线路的有些故障特征区别明显，而有些区别不明显。例如，在相电压相位为零时出现单相接地故障时，故障线路和非故障线路的暂态分量故障特征差别较小，而对有功分量和五次谐波法影响不大；如果电网中有功分量含量较少时，有功分量的选线准确度较低，而不影响暂态分量法和五次谐波法；同样，如果电网中五次谐波含量较少时，五次谐波法选线准确度较低，而不影响暂态分量法和有功分量法。

2) 受各种干扰因素的影响，故障选线装置测量到的故障特征量（如零序电流、零序功率方向等）具有很大的模糊性和不确定性。通常这些干扰的影响程度与故障检测信息的类别有关，同一干扰信号对不同的故障检测信息的影响相差较大。例如，开关操作产生的暂态信号对暂态零序电流影响较大，而对通过滤波测量的稳态零序电流影响较小；由于三相电容不平衡引起“虚假有功电流分量”对零序电流的有功分量影响较大，而对零序电流的暂态和谐波影响较小；电网中投切谐波源时对零序电流谐波影响较大，而对零序电流暂态和有功分量影响较小。

如果对各种故障特征信息进行综合分析，融合处理，就可以消除单一保护方法的固有缺陷，减少干扰信号的影响，提高故障检测的精度和鲁棒性。本章把零序电流的暂态分量、有功分量、五次谐波分量和基波分量作为故障特征，并进而定义这四种故障特征的故障测度，根据各种故障特征的故障测度，以粗糙集理论和神经网络为工具实现了基于信息融合的智能选线。并针对神经网络训练速度较慢的缺点，提出了基于粗糙集理论的样本归一化方法。



4.2 信息融合基本理论

在自动控制领域，单一的测量控制方法往往只能实现对被控对象的部分信息测量与处理，具有较大的不确定性，控制精度和鲁棒性较低。为了实现对被控对象的全面描述，通常采用多传感器数据融合处理技术，利用多传感器从不同的观测角度和基于不同的观测方法感知同一被控对象。由于测量同一对象的各种信息之间存在着普遍的有机联系，采用信息融合技术对多传感器测量的信息进行融合处理，获得被测对象的内在规律，便于建立准确可靠的控制方法。

4.2.1 信息融合的产生与发展

信息融合（Information Fusion）也称多传感器信息融合，或数据融合（Data Fusion）。这一概念是在 20 世纪 70 年代出于军事应用而提出来的，最初主要应用于军事领域。随着工业系统的复杂化，人们越来越认识到数据融合的重要性，使数据融合技术的研究与应用成为多源信息处理的非常活跃和广泛应用的方向。应用范围也不再局限于军事领域，在工农业诸领域如模式识别、图像处理、医疗诊断、遥感、工业过程控制、城市规划、气象等许多方面都得到了不同程度的应用，应用潜力非常巨大。信息融合到目前还没有一个公认的定义。文献[148]的定义主要从军事应用目的给出来的，但现在看来信息融合的含义远大于此。概括地说，信息融合就是对不同信息源或传感器采集的数据按既定的规则进行互联、相关、估计及结合，以实现对处理对象精确的和全面的描述，达到更好的理解。当前，信息融合技术已作为一门技术体系而被深入研究。



4.2.2 信息融合的功能与层次

信息融合作为一门研究信息综合分析处理技术的新兴边缘学科,强调在自动控制领域中利用多源信息进行综合分析推理以提高控制的精度和鲁棒性。信息融合学科是由许多传统学科和新学科在信息处理领域的集成与应用,涉及的学科有:通信、模式识别、决策论、不确定性理论、信号处理、估计理论、最优化技术、计算机科学、人工智能和神经网络等。在信息处理过程中的基本功能包括:相关、估计和识别。相关处理要求对多源信息的相关性进行定量分析,按照一定的判据原则,将信息分成不同的集合,每个集合中的信息都与同一源(目标或事件)关联。相关处理的方法通常有:最近邻法则、最大似然法、最优差别、统计关联、聚类分析等。估计处理是通过对各种已知信息的综合处理以实现对待测参数及目标状态的估计。估计处理的方法通常有:最小二乘法、最大似然法、卡尔曼滤波法等。识别技术包括物理模型识别技术、参数分类识别技术和认识模型识别技术,其中比较成熟的方法有:贝叶斯法、模板法、表决法、证据推理法、模糊识别、神经网络及专家系统等。

信息融合作为多源信息的处理技术是多层次的,通常可分为数据层信息融合、特征层信息融合和决策层信息融合。数据层信息融合是最低层次的融合,在各种传感器测量的原始数据未经预处理之前,直接对采集到的原始数据进行综合和分析。如继电保护中的故障启动元件,把各传感器测量的数据(AD采集数据)进行筛选,滤除病态数据,进行初步的数据处理,判断是否有故障突变信号产生。特征层信息融合属于中间层次融合,对来自传感器的数据进行特征提取,然后对特征信息进行综合分析和处理。决策层信息融合是一种高层次融合,结合对策知识对特征信息进行综合分析处理,并作出决策。



4.3 信息融合技术在故障选线中的应用

从信息处理的角度看，故障选线所采用的信息有：不同测量点的各电压信号和电流信号的 AD 采样值及系统结构参数（如中性点接地方式和配电网拓扑结构等，一般在整定值中反映）。故障选线过程是对这些信息进行融合处理，检测故障线路的过程。信息融合技术在故障选线中的应用如图 4-1 所示。故障选线信息融合过程分数据层信息融合、特征层信息融合和决策层信息融合。数据层信息融合对应于 AD 采集数据的滤波处理及故障启动检测。通常采用的数据层信息融合方法有：（1）差分滤波。采用当前采样值与六分之一周波前的采样值之差，滤除直流分量。（2）采样频率自动跟踪。利用前后两个周波的过零点后的第一个采样值的大小变化来自动跟踪频率变化并自动调整采样间隔。（3）零序电压启动判据： $\Delta U_0 = |U_{0k} - U_{0(k-n)}| - |U_{0(k-n)} - U_{0(k-2n)}| > U_{0qd}$ （ k 为当前采样点； n 为每周波采样点数； U_{0qd} 为突变量启动整定值，当突变量大于该值时启动故障检测）。而特征层信息融合对应于故障特征量的提取，实现参数估计。故障特征量有：正序、负序、零序、阻抗、导纳、功率、能量等，通用的提取方法有：傅里叶变换、卡尔曼滤波及小波变换等。决策层信息融合对测量点的故障特征量（正序、负序、零序、阻抗、导纳、功率、能量等）及对不同测量点的故障特征量（如比较各出线的零序电流）进行融合处理，判断故障线路。

数据层信息融合和特征层信息融合方法已在数字式故障选线装置中得到了较好的应用。但决策层信息融合技术仅在故障选线中得到初步的应用。现有的故障选线装置通常只采用单一的故障选线方法，比较各出线的零序电流进行故障选线。通常单一选线方法所利用的故障特征量有限，如果这些故障特征量受各种干扰



影响,可能导致选线的误动作,降低选线的准确度和可靠性。为此,一方面需研究不同的故障选线方法(对应不同的故障特征量)的融合处理,另一方面需研究配电网中不同测量点的各种故障特征量的融合处理,采用更多的故障特征量进行综合故障选线,有望消除干扰的影响,提高保护的精度和鲁棒性。目前随着微处理器信息处理能力的提高,高性能 CPU、DSP 等在继电保护装置中的应用,馈线保护已具有对各种故障信息进行综合处理的能力,适合决策层信息融合故障选线技术的实现;随着配电自动化的推广,分散分布式馈线自动化测控网络(SCADA 系统)将为空间上和时间上的各种故障信息提供决策层信息融合实现的平台。

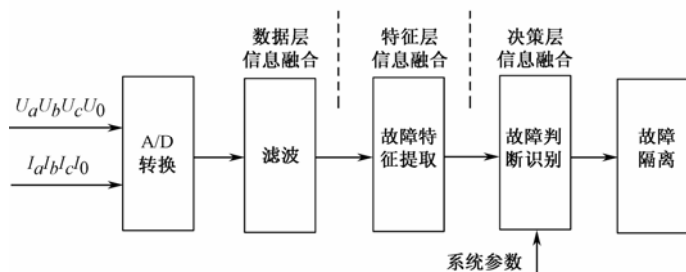


图 4-1 信息融合技术应用于故障选线

4.4 故障测度函数

为了实现基于多判据故障信息融合的选线方法,不应以每个判据简单地给出选线结果为目的,而是希望每个判据依据各自的特征量定量地度量出各条线路具有故障征兆的程度,再由融合决策环节做综合决策,给出选线结果。将各条线路故障征兆的程度度量作为故障测度。



4.4.1 故障测度函数的定义

本文将故障测度定义为 $[-1, 1]$ 上的实变量，一条线路的故障测度越接近 1，表明其越可能是故障线路；越接近-1，表明其越可能是非故障线路。设电网中有 N 条线路，采用 P 种选线方法，则对第 k ($k=1, 2, \dots, N$) 条线路采用第 p ($p=1, 2, \dots, N$) 种选线方法构建的故障测度函数为

$$X_p(k) = X_{rp}(k)X_{ap}(k) \quad (4-1)$$

式中： $X_{rp}(k)$ 为相对故障测度函数； $X_{ap}(k)$ 为可确定故障测度函数。 $X_{rp}(k)$ 反映电网中一条线路的故障测度与其他线路故障测度的比较值， $X_{ap}(k)$ 反映故障特征量的明显程度。

规则 4-1 配电网中若线路的故障测度大于 0.6，判断为故障线路，线路的故障测度小于-0.6，判断为非故障线路，故障测度处在 $[-0.6, 0.6]$ 之间的线路为无法判断。

规则 4-2 若配电网中所有线路的故障测度均小于-0.6，则判断为母线故障。

4.4.2 零序电流暂态分量的故障测度函数

当小电流接地系统发生单相接地故障时，利用 DB 小波包将流经各线路的暂态零序电流按一定频带宽度进行分解并剔除最低频段后，能量较大的频段即为该线路暂态电容电流分布较集中的频段，也就是故障特征最明显的特征频段。线路在能量较集中的几个频段的总能量定义为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\omega_{l_i}^{k_i}(j)]^2 \quad (4-2)$$

式中： $\omega_{l_i}^{k_i}(j)$ 为小波包分解在第 (k_i, l_i) 子频段下的系数； m 为能量较集中频带个数。在各线路暂态电容电流较集中的特征频段下，



只有故障线路满足如下条件：零序电流的小波包分解结果有较大的能量，且极性与其他线路相反。

对于有 n 条线路的配电网，设 $\varepsilon_{L_k}(k)$ 为线路 L_k 在本线路各特征频段的总能量； $\varepsilon_{\Sigma'}(k)$ 为线路 L_k 在所有线路各特征频段的总能量； $\varepsilon_{\Sigma'}$ 为所有线路在各自特征频段的总能量之和。当线路 L_k 的零序电流的小波包分解结果的极性与其他多数线路的分解结果相同时，线路 L_k 的 $\varepsilon_{L_k}(k)$ 在 $\varepsilon_{\Sigma'}$ 中占的比重越小越可能是非故障线路，相对故障测度越接近于 -1；反之越可能是故障线路，相对故障测度越接近于 0。又由于非故障线路的 $\varepsilon_{L_k}(k)$ 相对于故障线路小得多，因此定义相对故障测度函数如式 (4-3) 和图 4-2 (a) 所示。

$$y = \begin{cases} -1, & x \leq 1/5n \\ \frac{5}{9}(nx - 2), & 1/5n < x < 2/n \\ 0, & x \geq 2/n \end{cases} \quad (4-3)$$

当线路 L_k 的零序电流的小波包分解结果的极性与其他多数线路的分解结果相反时，由于线路 L_k 的 $\varepsilon_{L_k}(k)$ 在 $\varepsilon_{\Sigma'}$ 中占的比重越大越可能是故障线路，相对故障测度越接近于 1；反之越可能是非故障线路，相对故障测度越接近于 0，因此定义相对故障测度函数如式 (4-4) 和图 4-2 (b) 所示。

$$y = \begin{cases} 0, & x \leq 0.1 \\ \frac{5n}{2n+5}(x - 0.1), & 0.1 < x < 1/n + 0.5 \\ 1, & x \geq 1/n + 0.5 \end{cases} \quad (4-4)$$

由于线路 L_k 的 $\varepsilon_{L_k}(k)$ 在 $\varepsilon_{\Sigma}(k)$ 中占的比重越大，采用该方法进行判断的可信度越高，可确定故障测度越接近于 1，因此定义可确定故障测度函数如式 (4-5) 和图 4-3 所示。



$$y = \begin{cases} 0, & x \leq 0.1 \\ 2(x-0.1), & 0.1 < x < 0.6 \\ 1, & x \geq 0.6 \end{cases} \quad (4-5)$$

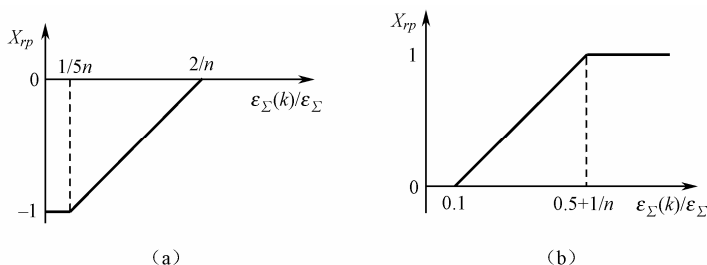


图 4-2 暂态分量的相对故障测度函数

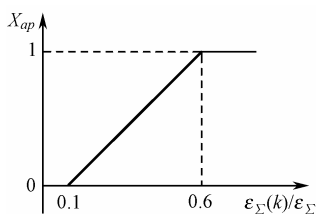


图 4-3 暂态分量的可确定故障测度函数

4.4.3 零序电流有功分量的故障测度函数

在小电流接地系统中，发生单相接地故障时，零序电流有功分量法利用故障线路的零序有功电流远大于非故障线路的零序有功电流且方向相反的特点进行故障选线。对于有 n 条线路的配电网，设 P_Σ 为所有线路零序有功功率的总和， $P(k)$ 为第 k 条线路的零序有功功率， $Q(k)$ 为第 k 条线路的零序无功功率。当线路的零序电流有功分量与其他多数线路方向相同时，线路的 $P(k)$ 在 P_Σ 中占的比重越小，越可能是非故障线路，相对故障测度越接近于-1；



反之越可能是故障线路，相对故障测度越接近于 0，因此定义相对故障测度函数如式 (4-6) 和图 4-4 (a) 所示。

$$y = \begin{cases} -1, & x \leq 1/5n \\ \frac{5}{4}(nx-1), & 1/5n < x < 1/n \\ 0, & x \geq 1/n \end{cases} \quad (4-6)$$

当线路的零序电流有功分量与其他线路方向相反时，线路的 $P(k)$ 在 P_{Σ} 中占的比重越大，越可能是故障线路，相对故障测度越接近于 1；反之越可能是非故障线路，相对故障测度越接近于 0。因此定义相对故障测度函数如式 (4-7) 和图 4-4 (b) 所示。

$$y = \begin{cases} 0, & x \leq 1/n \\ \frac{5}{3n-5}(nx-1), & 1/n < x < 0.6 \\ 1, & x \geq 0.6 \end{cases} \quad (4-7)$$

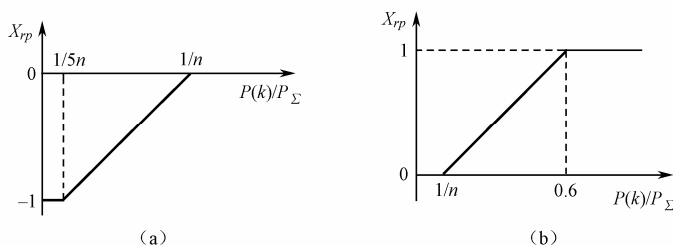


图 4-4 零序电流有功分量的相对故障测度函数

$P(k)/Q(k)$ 的值越大，即线路的零序有功功率在视在功率中占的比重越大，采用该方法进行判断的可信度越高，可确定故障测度越接近于 1，因此定义可确定故障测度函数如式 (4-8) 和图 4-5 所示。



$$y = \begin{cases} 0, & \lg x \leq -4 + \lg 2 \\ \frac{1}{2}(\lg x + 4 - \lg 2), & -4 + \lg 2 < \lg x < -2 + \lg 2 \\ 1, & \lg x \geq -2 + \lg 2 \end{cases} \quad (4-8)$$

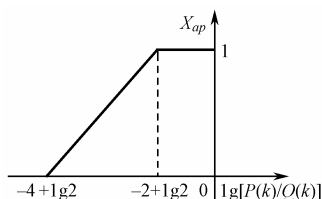


图 4-5 零序电流有功分量的可确定故障测度函数

4.4.4 零序电流五次谐波分量的故障测度函数

中性点经消弧线圈接地系统中的消弧线圈是按照基波整定的，可忽略消弧线圈对五次谐波的补偿效果。因此，可利用对五次谐波的群体比幅比相法解决谐振接地系统的故障选线问题。对于有 n 条线路的配电网，设 $I_{05}(k)$ 为第 k 条线路零序电流的五次谐波分量， $I_{01}(k)$ 为第 k 条线路零序电流的基波分量， I_{05} 为所有线路零序电流五次谐波分量的总和。当线路的零序电流五次谐波分量的方向与其他线路方向相同时， $I_{05}(k)/I_{05}$ 的值越小，即该线路的零序电流五次谐波分量在所有线路零序电流五次谐波分量总和中占的比重越小，该线路越可能是非故障线路，相对故障测度越接近于 -1；反之，线路越可能是故障线路，相对故障测度越接近于 0。因此定义相对故障测度函数如式 (4-9) 和图 4-6 (a) 所示。

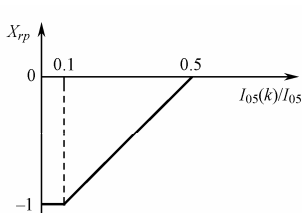
$$y = \begin{cases} -1, & x \leq 0.1 \\ 2.5(x - 0.5), & 0.1 < x < 0.5 \\ 0, & x \geq 0.5 \end{cases} \quad (4-9)$$

当线路的零序电流五次谐波分量的方向与其他线路方向相反时， $I_{05}(k)/I_{05}$ 的值越大，线路越可能是故障线路，相对故障测度越

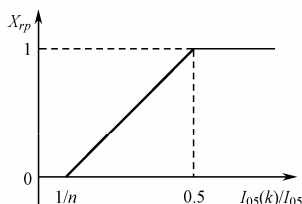


接近于 1；反之，线路越可能是非故障线路，相对故障测度越接近于 0。因此定义相对故障测度函数如式 (4-10) 和图 4-6 (b) 所示。

$$y = \begin{cases} 0, & x \leq 1/n \\ \frac{2}{n-2}(nx-1), & 1/n < x < 0.5 \\ 1, & x \geq 0.5 \end{cases} \quad (4-10)$$



(a)



(b)

图 4-6 五次谐波分量的相对故障测度函数

线路的零序电流五次谐波分量在该线路总零序电流中占的比重越大，该方法的可信度越高，可确定故障测度越接近于 1，因此定义可确定故障测度函数如式 (4-11) 和图 4-7 所示。

$$y = \begin{cases} 0, & \lg x \leq -4 - \lg 4 \\ \frac{1}{2}(\lg x + 4 + \lg 4), & -4 - \lg 4 < \lg x < -1 - \lg 4 \\ 1, & \lg x \geq -1 - \lg 4 \end{cases} \quad (4-11)$$

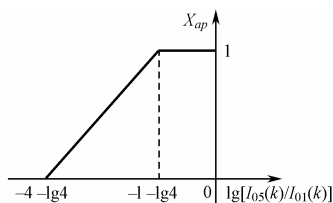


图 4-7 五次谐波分量的可确定故障测度函数



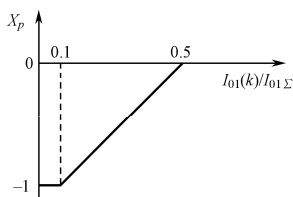
4.4.5 零序电流基波分量的故障测度函数

在中性点不接地系统中,发生单相接地故障时,利用故障线路的零序电流基波分量幅值大于非故障线路的零序电流的基波分量幅值且相位相反的特点进行故障选线。对于有 n 条线路的配电网,设 $I_{01\Sigma}$ 为所有线路零序电流基波分量的总和, $I_{01}(k)$ 为第 k 条线路的零序电流基波分量。当线路的零序电流基波分量的方向与其他多数线路方向相同时, $I_{01}(k)/I_{01\Sigma}$ 的比值越小,线路越可能是非故障线路,故障测度越接近于-1;反之,线路越可能是故障线路,故障测度越接近于0。因此定义故障测度函数如式(4-12)和图4-8(a)所示。

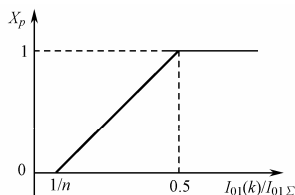
$$y = \begin{cases} -1, & x \leq 0.1 \\ 2.5(x-0.5), & 0.1 < x < 0.5 \\ 0, & x \geq 0.5 \end{cases} \quad (4-12)$$

当线路的零序电流基波分量的方向与其他线路方向相反时, $I_{01}(k)/I_{01\Sigma}$ 的比值越大,线路越可能是故障线路,故障测度越接近于1;反之,线路越可能是非故障线路,故障测度越接近于0。因此定义故障测度函数如式(4-13)和图4-8(b)所示。

$$y = \begin{cases} 0, & x \leq 1/n \\ \frac{2}{n-2}(nx-1), & 1/n < x < 0.5 \\ 1, & x \geq 0.5 \end{cases} \quad (4-13)$$



(a)



(b)

图4-8 基波分量的故障测度函数



4.5 基于粗糙集理论的融合选线方法

以上涉及的四种故障特征中，哪种故障特征对选线结果影响较大，是否有冗余的故障特征，都是未知的。因而我们利用粗糙集理论的数据挖掘能力，消去冗余的故障特征，融合对选线结果影响较大的故障特征，实现融合选线的目的。

4.5.1 基于粗糙集理论的融合选线原理

(1) 系统的结构框图

基于粗糙集理论的融合选线系统结构框图如图 4-9 所示。分别利用小波分析方法、五次谐波法、有功分量和基波比幅比相法从零序电流信号中提取暂态分量、五次谐波分量、有功分量和基波分量，并根据各自的故障测度函数计算其故障测度，再利用粗糙集理论将 4 种故障特征的故障测度融合，根据从训练样本中挖掘的决策规则，实现故障选线。

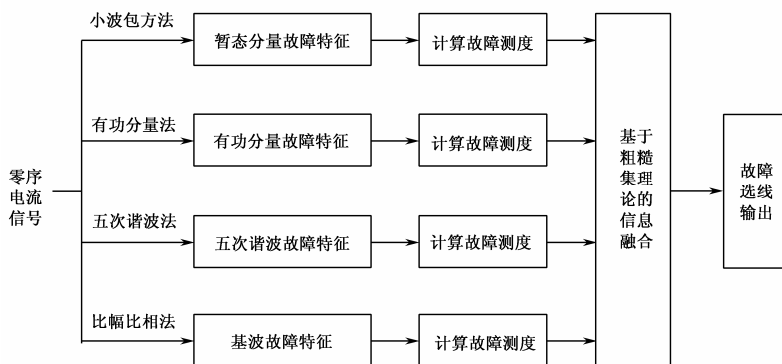


图 4-9 基于粗糙集理论的融合选线系统结构框图



(2) 基于粗糙集理论的融合选线信息系统

假设基于粗糙集的故障选线信息系统为 $K=(U, A)$, 论域 U 是从线路中获得的零序电流信号的集合, $A=C \cup D$ 是属性集, 条件属性集 C 是由从零序电流信号中提取的故障特征的故障测度组成的集合, D 是由线路的故障状态组成的集合。

规则 4-3 给定故障选线信息系统 $K=(U, A)$, $A=C \cup D$, 条件属性集定义为 $C=\{a, b, c, d\}$, 决策属性集定义为 $D=\{e\}$ 。

规则 4-4 给定故障选线信息系统 $K=(U, A)$, 条件属性集 $C=\{a, b, c, d\}$, 规定 a 表示暂态分量故障特征的故障测度, b 表示五次谐波分量故障特征的故障测度, c 表示有功分量故障特征的故障测度, d 表示基波分量故障特征的故障测度。

规则 4-5 给定故障选线信息系统 $K=(U, A)$, 规定决策属性集 $D=\{e\}$, 其中 e 表示线路所处的状态, 即是健全线路还是故障线路。

规则 4-6 给定故障选线信息系统 $K=(U, A)$, 条件属性集 $C=\{a, b, c, d\}$, 决策属性集 $D=\{e\}$, 根据各故障特征数据分布的特点, 利用等频率划分的离散化方法, 规定各条件属性和决策属性的编码方式为: $a: 1-1 \sim -0.5, 2-0.5 \sim -0.3, 3-0.3 \sim 0.3, 4-0.3 \sim 0.5, 5-0.5 \sim 1$; $b: 1-1 \sim -0.5, 2-0.5 \sim -0.3, 3-0.3 \sim 0.3, 4-0.3 \sim 0.5, 5-0.5 \sim 1$; $c: 1-1 \sim -0.5, 2-0.5 \sim -0.3, 3-0.3 \sim 0.3, 4-0.3 \sim 0.5, 5-0.5 \sim 1$; $d: 1-0 \sim 0.3, 2-0.3 \sim 0.5, 3-0.5 \sim 1$; $e: 1-\text{非故障}, 2-\text{故障}$ 。

(3) 基于粗糙集理论的融合选线算法

基于粗糙集理论的融合选线算法过程如图 4-10 所示。选线算法步骤如下:

① 利用 WPT 和 FFT 算法分别从零序电流信号中提取暂态分量、有功分量、五次谐波分量和基波分量的故障特征, 分别计算它们的故障测度, 形成原始数据。将原始数据划分成训练样本和测试样本。



② 按照规则 4-4、规则 4-5 分别将每种故障特征的故障测度转换成故障选线信息系统的属性。

③ 按照规则 4-6 将条件属性和决策属性离散化，构建决策表。

④ 对象相容性检查，删除不相容的对象。

⑤ 消去决策表中的重复对象。

⑥ 对条件属性进行约简，删除冗余属性，得到最小条件属性集。

⑦ 删除属性约简后决策表中的重复信息，得到最小规则集，即选线决策规则。

⑧ 利用测试样本和现场数据对选线模型进行测试，验证选线模型。

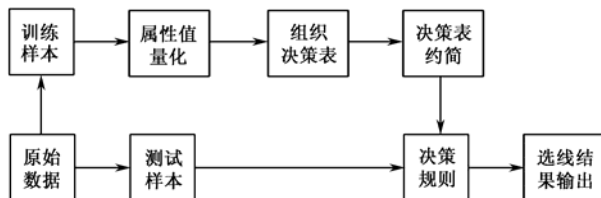


图 4-10 基于粗糙集理论的融合选线算法过程

4.5.2 基于粗糙集理论的融合选线方法实现

(1) 获取原始数据

EMTP-ATP 仿真模型采用图 3-3 的模型，模型参数采用 3.3.1 节中设定的参数。由于对于不同的电网，五次谐波和有功分量的含量不同。所以利用 ATP 仿真软件按以下几种情况进行大量的试验：五次谐波和有功分量含量均较多、仅五次谐波含量较多、仅有有功分量含量较多和五次谐波与有功分量含量均较少。其中，增加五次谐波含量可以通过在电源端增加五次谐波电源来实现，增加有功分量的含量通过增加中性点串联电阻的阻值来实现。对于以上每种电网，分别在 6 条线路的 10% 和 90% 处和电压相位为 0° 、



45° 和 90° 时通过 5Ω、50Ω、500Ω、2kΩ 的过渡电阻做单相接地试验。因为系统中有 6 条线路，所以每次接地故障可采集到 6 个零序电流信号，这样，共可采集到 $6 \times 4 \times 3 \times 2 \times 6 \times 4 = 3456$ 个零序电流信号，其中采样频率 3.2kHz。暂态信号取为故障前半周波和故障后一个半周波共两个周波的信号，利用 DB4 小波包对该暂态信号进行 4 层小波包分解，再根据公式 (4-2) 计算小波包分解系数的能量，然后根据公式 (4-3)、公式 (4-4) 和图 4-2 计算线路的相对故障测度，根据公式 (4-5) 和图 4-3 计算可确定故障测度，从而得到暂态故障特征的故障测度。稳态信号取为故障后三个周波后的信号，利用 FFT 算法分别计算零序电流信号中的有功分量和五次谐波分量。根据公式 (4-6)、(4-7) 和图 4-4 计算有功分量的相对故障测度，根据公式 (4-8) 和图 4-5 计算有功分量的可确定故障测度，从而得到有功分量的故障测度；根据公式 (4-9)、(4-10) 和图 4-6 计算五次谐波分量的相对故障测度，根据公式 (4-11) 和图 4-7 计算五次谐波分量的可确定故障测度，从而得到五次谐波分量的故障测度；根据公式 (4-12)、(4-13) 和图 4-8 计算基波分量的故障测度。从计算后的原始数据表中取一半数据作为训练样本，另一半样本作为测试样本，其中训练样本数据如表 4-1 所示。

表4-1 原始数据表

零序 电流 信号 编号	小波包方法			有功分量法			五次谐波法			基波
	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_p(k)$
1	0.7340	1.0000	0.7340	0.6005	0.1987	0.1193	0.0000	0.6348	0.0000	-0.9570
2	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.8506	0.1987	-0.1690	-1.0000	0.6348	-0.6348	-1.0000
3	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.6441	0.1987	-0.1280	-0.9248	0.6348	-0.5871	-0.9298
4	-0.8330	0.9678	-0.8061	-0.4308	0.1987	-0.0856	-0.8164	0.6348	-0.5182	-0.8230



续表

零序 电流 信号 编号	小波包方法			有功分量法			五次谐波法			基波
	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_p(k)$
5	-0.7611	0.8471	-0.6447	-0.2128	0.1987	-0.0423	-0.7079	0.6348	-0.4494	-0.7160
6	-0.2535	1.0000	-0.2535	0.0000	0.1987	0.0000	-0.5270	0.6348	-0.3345	-0.5380
7	0.0000	1.0000	0.0000	0.4783	0.1526	0.0730	0.0000	0.6405	0.0000	-0.8575
8	-0.9494	1.0000	-0.9494	-0.8123	0.1526	-0.1240	-1.0000	0.6405	-0.6405	-1.0000
9	-0.6701	1.0000	-0.6701	-0.5908	0.1526	-0.0902	-0.9299	0.6405	-0.5956	-0.9298
10	-0.3790	1.0000	-0.3790	-0.3592	0.1526	-0.0548	-0.8232	0.6405	-0.5272	-0.8228
11	-0.3671	1.0000	-0.3671	-0.1135	0.1526	-0.0173	-0.7165	0.6405	-0.4589	-0.7160
12	-0.1581	1.0000	-0.1581	0.0000	0.1526	0.0000	-0.5385	0.6405	-0.3449	-0.5378
...
1723	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	0.5596	-0.5596	-0.9575
1724	-0.7624	1.0000	-0.7624	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	0.5596	-0.5596	-1.0000
1725	-0.8719	1.0000	-0.8719	-0.9552	1.0000	-0.9552	-1.0000	0.5596	-0.5596	-0.9298
1726	-0.9468	1.0000	-0.9468	-0.8565	1.0000	-0.8565	-0.9276	0.5596	-0.5191	-0.8228
1727	-0.6635	1.0000	-0.6635	-0.7544	1.0000	-0.7544	-0.8477	0.5596	-0.4744	-0.7158
1728	0.9170	1.0000	0.9170	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.5596	0.5596	-0.5378

(2) 计算最小决策规则

根据规则 4-6 将表 4-1 中的原始数据离散化, 即可形成一个决策表。首先删除决策表中不相容的和重复的对象, 然后进行属性约简, 约简后的最小属性集为 $\{a, b, c\}$, 再经过规则约简后得到约简后的决策表。约简后决策表中的每个对象对应一条规则。合并相同的决策规则, 即可得到故障选线系统的最小决策算法为



$$\begin{aligned} & a_1b_1c_3 \vee a_1b_1c_4 \vee a_1b_3c_1 \vee a_1b_4c_1 \vee a_3b_1c_1 \vee a_4b_1c_1 \vee a_1b_2c_3 \\ & \vee a_1b_3c_2 \vee a_2b_1c_3 \vee a_2b_3c_1 \vee a_3b_1c_2 \vee a_3b_2c_1 \vee a_1b_2c_2 \vee a_2b_1c_2 \\ & \vee a_2b_2c_1 \vee a_1b_3c_3 \vee a_3b_1c_3 \vee a_3b_3c_1 \vee a_2b_2c_2 \rightarrow e_1 \\ & a_5 \vee b_5 \vee c_5 \vee a_4b_4 \vee a_4c_4 \vee b_4c_4 \vee a_4b_3c_3 \vee a_3b_4c_3 \vee a_3b_3c_4 \rightarrow e_2 \end{aligned} \quad (4-14)$$

由最小决策规则可知，基波分量对选线结果影响不大，这是因为基波比幅比相法只适用于中性点不接地系统的缘故。因此可以选择暂态分量、有功分量和五次谐波分量作为故障特征进行融合选线。

(3) 选线方法验证

利用仿真数据和现场数据对该选线方法进行验证，验证过程见 5.3.1 节。验证结果表明，该融合选线方法的选线精度高于每种基于单一故障特征的选线方法，但是选线准确度还是不够理想。

4.6 基于神经网络的融合选线方法

上一节利用粗糙集理论实现了小电流接地故障的融合选线，提高了选线的准确度和可靠性。但是，仿真结果（见 5.3.1 节）表明，在故障线路和非故障线路的故障特征差别不明显时，利用基于粗糙集理论的融合选线方法进行选线就会得到错误的结果。因此，选用分类精度较高的神经网络来实现融合选线。

4.6.1 神经网络基本理论

人工神经网络 (Artificial Neural Networks, ANN) 是在人类对其大脑神经网络认识理解的基础上人工构建的能够实现某种功能的神经网络。它是理论化的人脑神经网络的数学模型，是基于模仿大脑神经网络结构和功能而建立的一种信息处理系统。它实际上是由大量简单元件相互连接而成的复杂网络，具有高度的非线性



性，能够进行复杂的逻辑操作和非线性关系实现的系统。

人工神经网络技术可用于函数逼近、感知觉模拟、联想记忆和数据恢复等。从 20 世纪 80 年代初神经网络的研究再次复苏并形成热点以来，由于它的计算能力、对任何连续映射的逼近能力、学习理论以及动态网络的稳定性分析能力，在应用上已经扩展到了许多领域，主要的应用领域有：模式识别与图像处理、控制与优化、预测与管理与通信等。

综上所述，神经网络可用于建模困难的问题，同时也可提高模型的精度。在小电流接地故障选线系统中，提取的故障特征和故障选线结果之间具有复杂的非线性关系，很难建立精确的数学模型，因而采用神经网络来描述故障选线模型。

多层前向神经网络是由大量的简单处理单元（神经元）广泛连接而形成的网络系统，它具有很强的非线性映射能力，能以任意精度逼近任意连续非线性函数。其中主要是以 BP 算法为基础的 BP 网络。由于该网络简便且易于编程处理从而成为应用最广泛的神经网络模型。下面首先介绍一下 BP 神经网络的基本原理。

BP (Back Propagation) 神经网络是目前应用最为广泛的一种多层前向型网络，其特点就是前向计算与误差的反向传递。它由一个输入、输出层和若干隐含层组成，同层节点没有任何耦合，层与层之间由权值相连。一个具有 n 个输入节点、若干隐含层和 m 个输出节点的 BP 网络，可看作一个从输入到输出的高度非线性映射：

$$F: R^n \rightarrow R^m, y = F(x) \quad (4-15)$$

三层神经网络的拓扑结构图如图 4-11 所示。

BP 网络学习是典型的有导师学习，算法的学习由下面 4 个过程组成：（1）模式正向传播：输入值由输入层经隐含层处理，并传向输出层，每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态；（2）误差反向传播：如果在输出层不能得到预期的结果，则将输出误差由输出层向输入层逐层修正连接权；（3）迭代训练过程：



由正向传播和反向传播的反复交替进行网络的训练、记忆；（4）收敛过程：网络趋向收敛即网络的全局误差趋向极小值的过程。过程可归纳为：“模式顺传播、误差逆传播、记忆训练化、学习收敛化。”

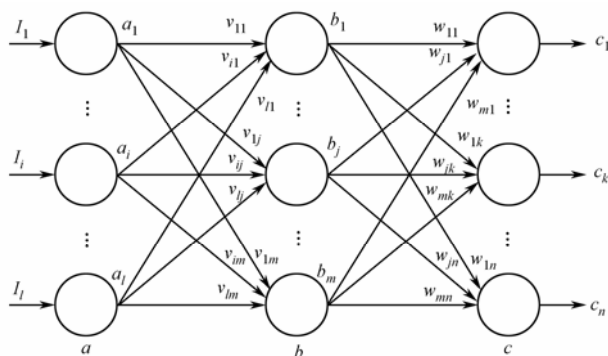


图 4-11 三层神经网络拓扑结构图

设 E_p 为第 p 个样本进行网络训练时输出层上的二次型误差函数，其表达式为：

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (t_p^k - c_p^k)^2 \quad (4-16)$$

式中： t_p^k 为第 p 个训练模式在输出层第 k 个处理单元上的期望输出值； c_p^k 为第 p 个训练模式在输出层第 k 个处理单元上的实际输出值。

对第 p 个模式，输出层单元 k 的加权输入为：

$$c_{knet} = \sum_{j=1}^m \omega_{jk} b_j + \theta_k \quad (4-17)$$

式中： θ_k 表示输出层单元 k 的阈值。阈值起到调节神经元兴奋水平的作用。



该单元的设计输出为

$$c_k = f(c_{knet}) \quad (4-18)$$

隐含层单元 j 的加权输入为

$$b_{jnet} = \sum_{i=1}^l v_{ij} a_i + \theta_j \quad (4-19)$$

该单元的实际输出为

$$b_j = f(b_{jnet}) \quad (4-20)$$

式 (4-18) 和式 (4-20) 中函数为神经元的激励函数。

对于输出单元 k , 定义一般化误差为

$$d_k = -\frac{\partial E_p}{\partial c_{knet}} \quad (4-21)$$

式 (4-21) 可写成下面形式

$$d_k = -\frac{\partial E_p}{\partial c_k} \cdot \frac{\partial c_k}{\partial c_{knet}} = -\frac{\partial E_p}{\partial c_k} f'(c_{knet}) \quad (4-22)$$

对于隐含层单元 j , 同样定义一般化误差为

$$e_j = \frac{\partial E_p}{\partial b_{jnet}} \quad (4-23)$$

类似地, e_j 有下面的形式:

$$\begin{aligned} e_j &= -\frac{\partial E_p}{\partial b_j} \cdot \frac{\partial b_j}{\partial b_{jnet}} = f'(b_{jnet}) \left(-\sum_{k=1}^n \frac{\partial E_p}{\partial c_{knet}} \cdot \frac{\partial c_{knet}}{\partial b_{ji}} \right) \\ &= f'(b_{jnet}) \left\{ \sum_{k=1}^n d_k \left[\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^m \omega_{jk} b_j + \theta_k \right)}{\partial b_j} \right] \right\} = f'(b_{jnet}) \sum_{k=1}^n d_k \omega_{jk} \end{aligned} \quad (4-24)$$

式 (4-24) 可视为前层单元误差逆传播到该层的误差。

在现有的连接权 ω_{jk} 和 v_{ij} 下, 为了减小误差函数 E_p , 需决定如何变化连接权。这可由梯度下降规则来完成 (即连接权的变化



正比于负梯度)。因此,有

$$\Delta \omega_{jk} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial \omega_{jk}} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial c_{knet}} \cdot \frac{\partial c_{knet}}{\partial \omega_{jk}} = \eta d_k \left[\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^m \omega_{jk} b_j + \theta_k \right)}{\partial \omega_{jk}} \right] = \eta d_k b_j \quad (4-25)$$

同理

$$\Delta v_{ij} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial v_{ij}} = -\frac{\partial E_p}{\partial b_{jnet}} \cdot \frac{\partial b_{jnet}}{\partial v_{ij}} = \eta e_j a_i \quad (4-26)$$

式(4-25)和式(4-26)中, η ($0 < \eta < 1$) 为学习速率。阈值的学习方法与权值的学习方法类似(略)。

反向传播过程是通过调整连接权值和阈值以逐步降低实际输出与期望输出之间的误差。学习过程中有两种权值和阈值的改变方式:一种是先对提供的所有模式的导数求和,再改变权值,是训练期的学习方式。这种方式对每个模式计算出权值误差导数,直到该训练期结束时才累加,此时计算权值变化并把它加到实际的权值数组上,每个周期只做一次。由于权值的修正是在输入所有样本、计算其总的误差后进行的,称此为批处理修正。批处理修正可以保证其误差向减小的方向变化。另一种是在计算每个模式的导数后,改变权值和阈值,在处理下一个模式之前把权值和阈值的改变量分别加到原来的权值和阈值上,是模式学习方式。

4.6.2 基于神经网络的融合选线方法

(1) 神经网络模型

故障选线的神经网络模型采用 BP 网络,如图 4-12 所示。分别以采用小波包分析法、有功分量和五次谐波法从零序电流信号中提取的暂态分量、有功分量和五次谐波分量的故障特征的故障测度



作为神经网络的输入，输出为选线结果。该神经网络模型是一个含有两个隐层的4层前向神经网络，具有3个输入节点和1个输出节点，第1个隐层采用8个节点，第2个隐层采用3个节点。

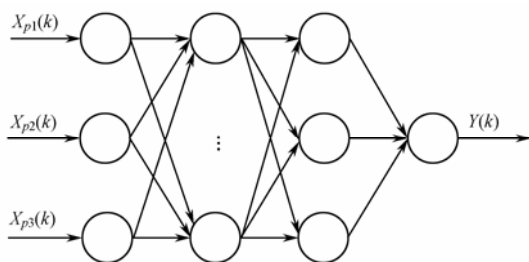


图 4-12 神经网络模型

(2) 基于神经网络的融合选线算法

基于神经网络的融合选线系统的结构框图如图 4-13 所示。通过小波包分析法、有功分量法和五次谐波法分别从零序电流信号中提取零序电流的暂态分量、有功分量和五次谐波分量，并计算其故障测度，将其分别作为神经网络的输入，利用神经网络对三种故障测度进行信息融合，神经网络的输出即为故障选线结果。

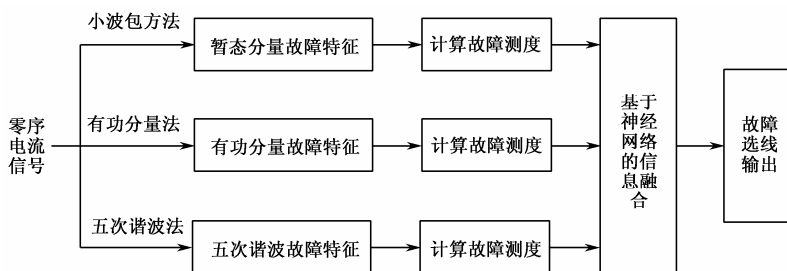


图 4-13 基于神经网络的融合选线系统结构框图



基于神经网络的融合选线算法步骤如下：

① 利用小波包分析法、有功分量和五次谐波法分别从零序电流信号中提取零序电流的暂态分量、有功分量和五次谐波分量的故障特征。

② 分别计算三种故障特征的故障测度，形成原始数据。

③ 从原始数据中提取一部分数据作为训练样本，另一部分作为测试样本。

④ 利用 BP 算法对神经网络进行训练，训练完成后得到故障选线模型。

⑤ 利用测试样本对神经网络选线模型进行验证。

(3) 神经网络训练

训练样本取为表 4-1 中的数据。利用 BP 算法以 MATLAB6.5 为工具对神经网络进行训练，其中两个隐含层各节点的激活函数均采用双曲正切 S 型传递函数 (tansig)，输出层采用线性传递函数 (purelin)，误差平方和取为 0.1，学习速率取为 0.0005。经过 10000 步训练，用时 542.36s，得到的各层权值和阈值如表 4-2 所示，训练过程如图 4-14 所示。利用该神经网络模型对 3 种故障特征的故障测度进行融合后得到一个融合后的故障测度。根据规则 4-1 和规则 4-2 确定故障线路。

表4-2 神经网络模型的权值和阈值

w_2								b_2
-0.1430	0.4457	-0.1518	-0.1218	0.0357	-0.5834	-0.0841	0.2331	0.1554
-0.0003	1.1349	1.2503	1.1121	0.3431	-1.0861	0.7567	1.0441	-0.3241
0.5741	-0.7056	-1.0984	-0.7264	0.4970	0.9328	-0.9250	-0.4462	0.5479
w_1			b_1	w_3			b_3	
-0.5089	-1.3200	0.3951	-0.3031	-0.0443	0.8608	-0.1704	0.0041	
1.0967	1.3101	0.1071	-0.1260					
1.6330	0.4877	0.8627	0.1841					



续表

w_1			b_1	w_3			b_3	
1.4583	0.4949	0.7678	0.1647					
1.1526	-0.7544	-0.2126	0.4030					
-1.4304	0.1225	-1.0242	-0.1012					
0.6939	1.4230	0.7437	0.3718					
0.9122	-0.3733	1.2050	0.0789					

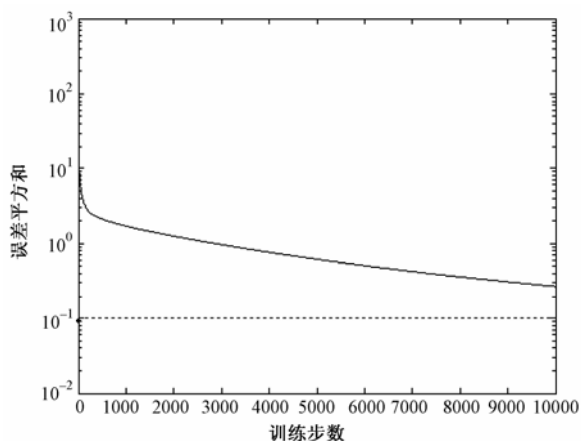


图 4-14 神经网络训练过程

4.7 基于神经网络的融合选线方法改进

由于 BP 神经网络算法本身存在着收敛速度慢且容易陷入局部最小的缺点，基于神经网络的故障选线方法在实际应用中受到了一定的限制。针对神经网络的不同类训练样本距离较近时训练速度较慢的缺点，提出了基于粗糙集理论的样本归一化方法，并将其应用到基于神经网络的融合选线中。



4.7.1 BP神经网络的局限性及改进

(1) BP神经网络的局限性

BP神经网络克服了感知器网络和线性神经网络的局限性，可以实现任意线性或非线性的函数映射。但BP算法并不是十分的完善，它存在以下一些主要缺陷：

1) BP算法的收敛速度慢，常常需要成千上万次的迭代，而且随着训练样本维数的增加，网络性能会变差，不能保证网络收敛。

2) BP算法从数学角度看是一种梯度最速下降法，这就可能出现局部极小的问题。当出现局部极小时，从表面上看，误差符合要求，但这时所得的解并不一定是问题的真正解。

3) BP网络中隐含层神经元的数目的选取没有理论指导，目前仅有一些经验的选取方法。

4) BP网络并没有反馈存在，实际运行仍是单向的，所以它并不是一个非线性动力学系统，只是一个非线性映射系统。

5) BP网络的泛化能力较差。训练中往往会出现这样的情况，当网络的训练误差很小的时候，一个新的输入会使网络的训练误差迅速增大。

(2) BP算法的改进

针对神经网络的以上缺点，许多专家、学者做了大量的改进工作，主要有以下几种改进措施：

1) 采用自适应学习率

当连续两次迭代的梯度方向相同时，表明下降太慢，可以使步长加倍；当连续两次迭代的梯度方向相反时，表明下降过头，这时应使步长减小。由于步长在迭代过程中自适应地进行调整，可使误差函数量在超曲面上的不同方向按照各自比较合理的步长向极小点逼近。



$$\eta = \begin{cases} a\eta, & \text{如果连续出现 } \Delta E < 0 \\ b\eta, & \text{如果连续出现 } \Delta E > 0 \\ \eta, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (4-27)$$

其中, $a>1, 1<b<1$, E 为误差函数。

2) 入动量项

加入此项以记忆上一时刻的修改方向, 而当前时刻的修改方向则为上一时刻修改方向与当前时刻方向的组合。加入动量项能够降低网络对于误差曲面局部细节敏感性, 有效地抑制网络陷入局部极小。取动量项

$$\Delta w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) - w_{ij}(k-2) \quad (4-28)$$

$\alpha(\alpha \in (0,1))$ 为动量项系数, 一般取为 0.9。因此权值修改公式为

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + \alpha \Delta w_{ij}(k) \quad (4-29)$$

3) 样本的归一化

为了保证 BP 网络的运行稳定, 可将样本数据进行归一化预处理, 即通过简单的线性变换, 将网络的输入和输出数据化为 $[0,1]$ 区间或 $[-1,1]$ 区间的数。但是, 在实际应用中发现这种方法有时未必见效, 甚至出现训练不一定收敛。因为归一化可能导致区间中某一点 (有时是区间中点) 附近样本过于集中, 如果该点附近某点存在大扰动, 都可能导致整个网络瘫痪, 网络的整体误差难以下降。为避免上述情况的发生, 可将归一化方法适当地调整, 即将样本数据通过线性变换转化到区间 $[a, b](a < b)$, 区间端点 a, b 的取值应根据实际情况确定, 要保证区间长度适当, 防止过小或过大, 如果 $[a, b]$ 中样本数据过于集中, 可将区间适当拉长; 反之, $[a, b]$ 内样本过于稀疏, 应将区间长度适当缩短, 使数据在区间内分布更合理, 满足训练的需要。

4) 数据预处理

采用粗糙集理论和主成分分析法在不改变神经网络模型分类



精度的情况下降低输入变量维数和减少训练样本数，使模型结构简单、训练速度快。

① 主成分分析法。首先采用零均值标准化方法或者归一化方法对数据进行标准化，再建立标准化变量的协方差矩阵，并求解矩阵的特征值和特征向量，利用标准化值计算变量之间的相关系数，由 k 个变量建立 k 阶矩阵，然后选取主成分，计算第 i 个主成分对总方差的贡献率，即方差贡献率 $\rho_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^k \lambda_i$ ，其中 λ_i 为第 i 个特

征向量，并按贡献由大到小进行排序，贡献率最大的主成分称为第一主成分，其次称为第二主成分，依此类推。从而从多因素中删去一些不重要的因素而转化为少数几个不相关的综合因素。

② 粗糙集理论方法。将神经网络的输入变量作为条件属性，将神经网络的输出作为决策属性，从而构建决策表。通过属性约简和值约简得到最小条件属性集和规则集，最小属性集中的元素对应降维后的神经网络的输入变量，规则集中的规则对应简化后的训练样本。从而实现了神经网络输入变量降维和减少训练样本数量的目的。

5) 与其他全局搜索算法相结合

为了克服 BP 算法全局搜索能力弱和神经网络结构难以确定的缺点，将 BP 算法与具有很强全局搜索能力的算法相结合，如遗传算法、蚁群算法等。

4.7.2 基于粗糙集理论的样本归一化方法

在神经网络的训练样本中，不同类训练样本距离较近时训练速度较慢，如果将这些样本做伸缩处理，使距离较近的不同类样本的距离增大，就会使神经网络的训练速度显著提高。本章采用粗糙集理论实现对训练样本的归一化处理。



(1) 基于粗糙集理论的样本归一化原理

将训练样本的输入量作为条件属性，输出量作为决策属性，再将各属性离散化后得到该信息系统的决策表。对决策表分别进行属性约简和值约简后得到简化的决策表。

定义 4-1 对于信息系统 $K=(U, A)$, $U=\{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 为所有样本的集合，决策属性集定义为 $D=\{d\}$ ，不同的决策属性值对应于不同的类。

定义 4-2 对于信息系统 $K=(U, A)$ ，条件属性集为 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ， p 类样本的平均能量定义为：

$$W_p = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_i(u_{p_j})^2, p=1, 2, \dots, r \quad (4-30)$$

式中： $c_i(u_{p_j})$ 表示 p 类的第 j 个样本的 c_i 属性对应的属性值。

定义 4-3 对于信息系统 $K=(U, A)$ ，条件属性集为 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ， p 类第 j 个样本与 q 类第 k 个样本间的距离定义为：

$$d_{p_j q_k} = \left(\sum_{i=1}^n (c_i(u_{p_j}) - c_i(u_{q_k}))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-31)$$

$$p \neq q, p, q=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, t$$

式中： $c_i(u_{p_j})$ 表示 p 类的第 j 个样本的 c_i 属性对应的属性值； $c_i(u_{q_k})$ 表示 q 类的第 k 个样本的 c_i 属性对应的属性值。

定义 4-4 p 类的第 j 个样本与 q 类中所有样本间的最小距离定义为：

$$d_{p_j q} = \min_k d_{p_j q_k} \quad (4-32)$$

$$p \neq q, p, q=1, 2, \dots, r; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, t$$

规则 4-7 对于任意原始训练样本的第 i 个输入为 $x_i \in [0, 1]$ ，在决策表中与其对应的样本为 u_{p_j} （与其相等或距离最近的样本）， u_{p_j} 与 q 类中所有样本间的最小距离为 $d_{p_j q}$ ，则 x_i 按下式进行伸缩预处理：



$$y_i = x_i \cdot \left(1 + \frac{S_1}{d_{pjq}} \right) \quad W_p > W_q \quad (4-33)$$

$$y_i = x_i \cdot \left(1 - \frac{S_2}{d_{pjq}} \right) \quad W_p < W_q \quad (4-34)$$

$$p \neq q, p, q=1,2,\dots,r; j=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots,t$$

式中: S_1 和 S_2 表示尺度因子; W_p 、 W_q 分别表示 p 类、 q 类样本的平均能量; y_i 为伸缩后样本的第 i 个输入。

规则 4-8 原始样本的各输入量按下式进行归一化预处理:

$$z_i(l) = \frac{y_i(l) - \min_l(y_i(l))}{\max_l(y_i(l)) - \min_l(y_i(l))} \quad (4-35)$$

式中: $y_i(l)$ 为经伸缩后第 l 个样本的第 i 个输入量, $z_i(l)$ 为经归一化后第 l 个样本的第 i 个输入量。

规则 4-9 对于任意测试样本的第 i 个输入为 $v_i \in [0,1]$, ($i=1,2,\dots,M$), 在决策表中与其对应的样本为 u_{p_j} (与其相等或距离最近的样本), u_{p_j} 与 q 类中所有样本间的最小距离为 d_{pjq} , 则 v_i 按下式进行伸缩预处理:

$$y_i = v_i \cdot \left(1 + \frac{S_1}{d_{pjq}} \right) \quad W_p > W_q \quad (4-36)$$

$$y_i = v_i \cdot \left(1 - \frac{S_2}{d_{pjq}} \right) \quad W_p < W_q \quad (4-37)$$

式中: y_i 为经伸缩后的样本的第 i 个输入量。然后根据公式 (4-35) 进行归一化处理。

在测试样本与两类训练样本距离较近时, 如果按另一类样本的伸缩方法进行处理后, 利用神经网络分类时就可能将其判断为另一类样本, 出现分类错误, 因此做了如下规定。



规则 4-10 对于任意测试样本 $v_i \in [0,1], (k=1,2,\cdots,M)$ ，如果与其对应的 q 类的第 i 个训练样本和 r 类的第 j 个训练样本间的距离 $d_{q_i r_j}$ 满足

$$d_{q_i r_j} < \beta \quad (4-38)$$

β 为一个较小的数。表示测试样本和两类样本的距离差别不大，则测试样本 v_i 不进行伸缩处理。

(2) 基于粗糙集理论的样本归一化算法步骤

基于粗糙集理论的样本归一化算法过程如图 4-15 所示。样本归一化算法步骤如下：

- 1) 将样本的输入量作为条件属性，输出量作为决策属性，并将其离散化，得到信息系统决策表。
- 2) 分别进行属性约简和值约简，得到简化的决策表。
- 3) 根据公式 (4-31) 计算与不同类样本的最小距离。
- 4) 根据规则 4-7 和规则 4-8 进行归一化处理。
- 5) 利用归一化后的学习样本对神经网络进行训练。
- 6) 根据规则 4-9 和规则 4-10 对测试样本进行归一化。
- 7) 利用归一化后的测试样本对神经网络进行验证。

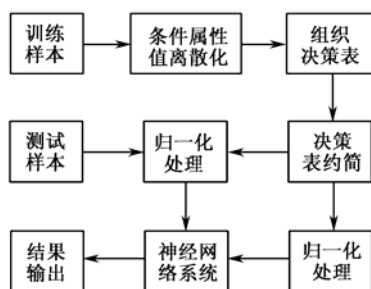


图 4-15 基于粗糙集理论的样本归一化算法过程



4.7.3 基于粗糙集样本归一化的神经网络融合选线

(1) 建立决策表

EMTP-ATP 仿真模型采用图 3-3 的模型, 获得的原始数据如表 4-1 所示。根据规则 4-11 对原始数据进行离散化。

规则 4-11 给定故障选线信息系统 $K=(U, A)$, 条件属性集 $C=\{a, b, c\}$, 决策属性集 $D=\{d\}$, a 表示暂态分量故障特征的故障测度, b 表示五次谐波分量故障特征的故障测度, c 表示有功分量故障特征的故障测度, d 表示线路的故障状态。根据各故障特征数据分布的特点, 利用等频率划分的离散化方法, 规定各条件属性和决策属性的编码方式为: a : 1— $-1 \sim -0.5$, 2— $-0.5 \sim -0.3$, 3— $-0.3 \sim 0$, 4— $0 \sim 0.3$, 5— $0.3 \sim 0.5$, 6— $0.5 \sim 1$; b : 1— $-1 \sim -0.5$, 2— $-0.5 \sim -0.3$, 3— $-0.3 \sim 0$, 4— $0 \sim 0.3$, 5— $0.3 \sim 0.5$, 6— $0.5 \sim 1$; c : 1— $-1 \sim -0.5$, 2— $-0.5 \sim -0.3$, 3— $-0.3 \sim 0$, 4— $0 \sim 0.3$, 5— $0.3 \sim 0.5$, 6— $0.5 \sim 1$; d : 1—非故障, 2—故障。

将原始数据离散化后即得到该信息系统的决策表, 分别对决策表进行属性约简和值约简后得到简化的决策表。

(2) 归一化处理

利用简化的决策表, 取 $S_1=8$, $S_2=0.05$, 根据规则 4-7 和规则 4-8 对训练样本进行归一化处理。利用传统样本归一化方法和利用基于粗糙集理论的样本归一化方法分别对训练样本进行归一化处理后的数据如图 4-16 (a)、(b) 所示。

(3) 神经网络训练

采用的神经网络模型如图 4-12 所示。利用 BP 算法对神经网络进行训练, 训练参数如 4.6.2 (3) 节中所述, 训练步数取为 5000 步。经过 156.75s 训练后, 得到神经网络的各层权值和阈值如表 4-3 所示, 学习过程曲线如图 4-17 所示。经过与未经粗糙集归一化的



训练过程(图 4-14)比较可知,经粗糙集理论归一化处理后的训练时间明显缩短。训练完成后的神经网络即为故障选线模型。

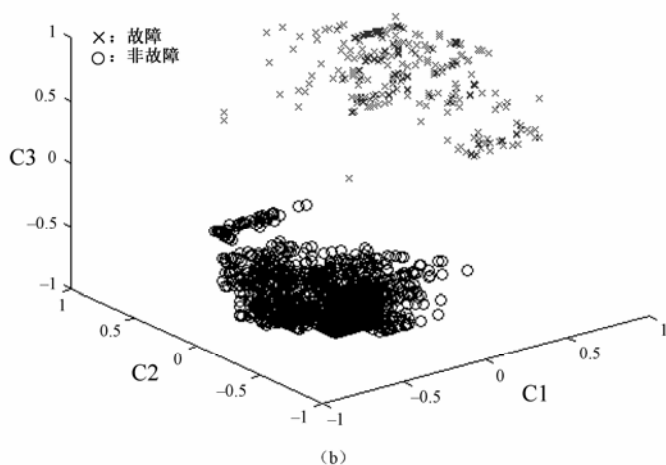
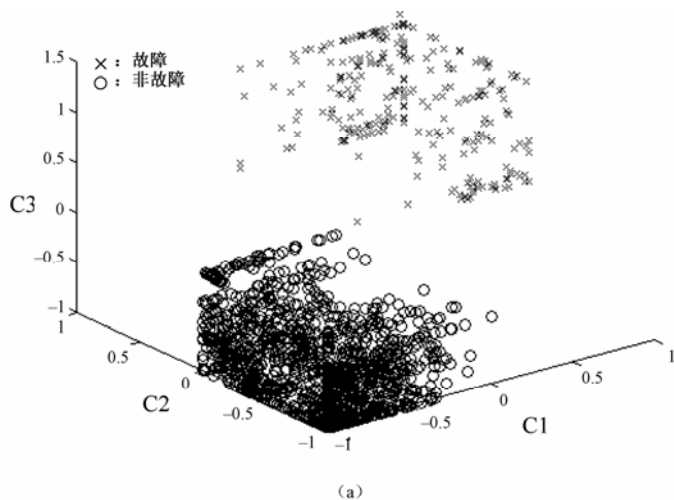


图 4-16 样本归一化后的数据



表4-3 神经网络的权值和阈值

w_2								b_2
0.2492	0.1414	-0.0240	0.3647	-0.0842	0.0616	-0.5113	-0.2455	0.7650
-0.4908	0.3916	0.1497	0.2948	-0.2653	-0.1337	-0.1022	0.1189	0.1323
-1.1897	0.8278	-1.0037	-0.3750	-0.5664	-0.3427	-0.1894	-0.4032	-0.7254
w_1				b_1	w_3			b_3
-1.3845	-0.9409	-0.0068	-0.2303	0.1444	-0.1273	1.0718	-0.0926	
0.0242	0.5148	1.4689	0.4797					
-1.1381	-1.0045	-0.5098	-0.4838					
-0.1372	1.0291	-0.9173	-1.0801					
-0.5037	-1.0942	-0.8370	-0.2040					
-0.5090	0.8944	-0.9938	-0.1236					
0.6158	0.0345	-1.2382	-1.3838					
-1.3336	-0.0927	-0.3023	0.3552					

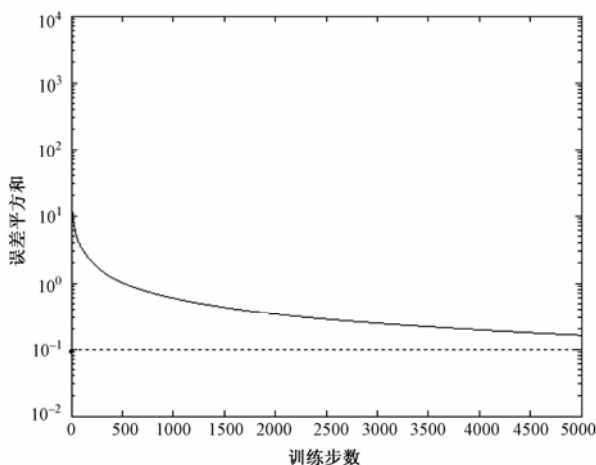


图 4-17 神经网络学习过程曲线



(4) 故障选线模型的验证

将测试样本根据规则 4-9 和规则 4-10 归一化处理后, 用该故障选线模型进行故障选线。由测试结果知, 选线的正确率为 99.94%, 该模型的选线准确度与未经粗糙集样本归一化处理的神经网络选线模型的选线准确度相同。因此该模型正确、有效。

4.8 本章小结

小电流接地系统发生单相接地故障时, 故障特征有些明显, 有些不明显, 将利用各种故障特征的选线方法融合起来的基于信息融合的故障选线方法是一种更可靠的故障选线方法。本章首先针对各种故障特征的特点, 分别定义了它们的故障测度, 用其反映线路是故障线路的程度, 然后利用粗糙集理论对各种故障特征的故障测度进行融合, 实现了小电流接地系统的智能融合选线。仿真结果表明, 基于粗糙集理论的融合选线方法虽然比利用单一故障特征的选线方法的选线准确度高, 但是选线准确度依然不很高。因而, 在基于粗糙集理论的融合选线基础上, 又提出了基于神经网络的融合选线方法。针对神经网络的训练样本中不同类样本间的距离较近时训练速度较慢的问题, 提出了基于粗糙集理论的样本归一化方法, 并将其应用于基于神经网络的融合选线中, 验证了该方法可以有效地提高了神经网络的训练速度。因此, 小电流接地故障选线装置应采用基于神经网络的融合选线方法作为选线判据。

第5章 小电流接地故障选线方法的 仿真与现场验证

本章利用电磁暂态仿真软件 EMTP-ATP 建立了小电流接地系统的仿真模型，针对各种故障情况，获得了大量单相接地故障时的零序电流和零序电压数据。并利用这些数据以 MATLAB 为工具分别对基于故障暂态特征信息的智能选线方法和基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线方法进行了验证。

以山东淄博科汇电气有限公司的 XJ-100 小电流接地选线装置采集的现场数据对基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线方法进行了验证。

5.1 仿真模型及参数

EMTP (Electro Magnetic Transient Program) 电磁暂态仿真程序最早在 1969 年由加拿大英属哥伦比亚大学 H. W. Dommel 博士开发，为电磁暂态仿真方面最权威的软件。但该程序基于 DOS 操作系统，界面不够友好。为克服该问题，丹麦哥本哈根大学 Han Kr. Hoidalén 在使用高版本 EMTP 作内核程序的基础上，编写了 ATP (Alternate Transient Program) 程序包。该软件使用 Windows 界面，可适用 Win9X/NT/2000/XP 操作系统，人机界面友好、使用方便。



本书采用 EMTP 及其改进后的 ATP 仿真软件,对小电流接地系统的单相接地故障进行了大量的仿真。利用 MATLAB 编写各种选线方法的程序,调用电磁暂态仿真程序仿真的各种单相接地故障数据,验证各种选线方法。

系统的仿真模型如图 3-3 所示,模型参数如 3.1.3 (1) 节中所述。

5.2 基于故障暂态特征信息的智能选线方法验证

为了充分验证基于粗糙集信号增强的小波包选线方法的有效性,下面针对几种容易出现选线误动作的单相接地情况对该方法进行验证。高频采样频率取为 51.2kHz,由于暂态分量的最大值出现在故障初期,所以采样数据窗长取为故障前 $\frac{1}{12}$ 周波和故障后 $\frac{1}{6}$ 周波共 $\frac{1}{4}$ 个周波,从中提取最大值和首波头极性。低频采样频率取为 3.2 kHz,采样数据窗长取为故障前 $\frac{1}{4}$ 周波和故障后 $1\frac{3}{4}$ 周波共 2 个周波,利用小波包分析方法对该信号进行分解实现故障选线。为了便于进行信号比较,显示的高频采样和低频采样的信号波形的数据窗长均取为故障前 $\frac{1}{4}$ 周波和故障后 $1\frac{3}{4}$ 周波共 2 个周波。

(1) 仿真算例 1

在相电压相位为 90° 时,在 L_1 的 10% 处出现接地电阻为 50Ω 单相接地故障。由第 3 章的分析可知,该故障利用通常的小波包选线方法会出现误判。 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 的高频采样和低频采样的信号分别如图 5-1 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-1 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

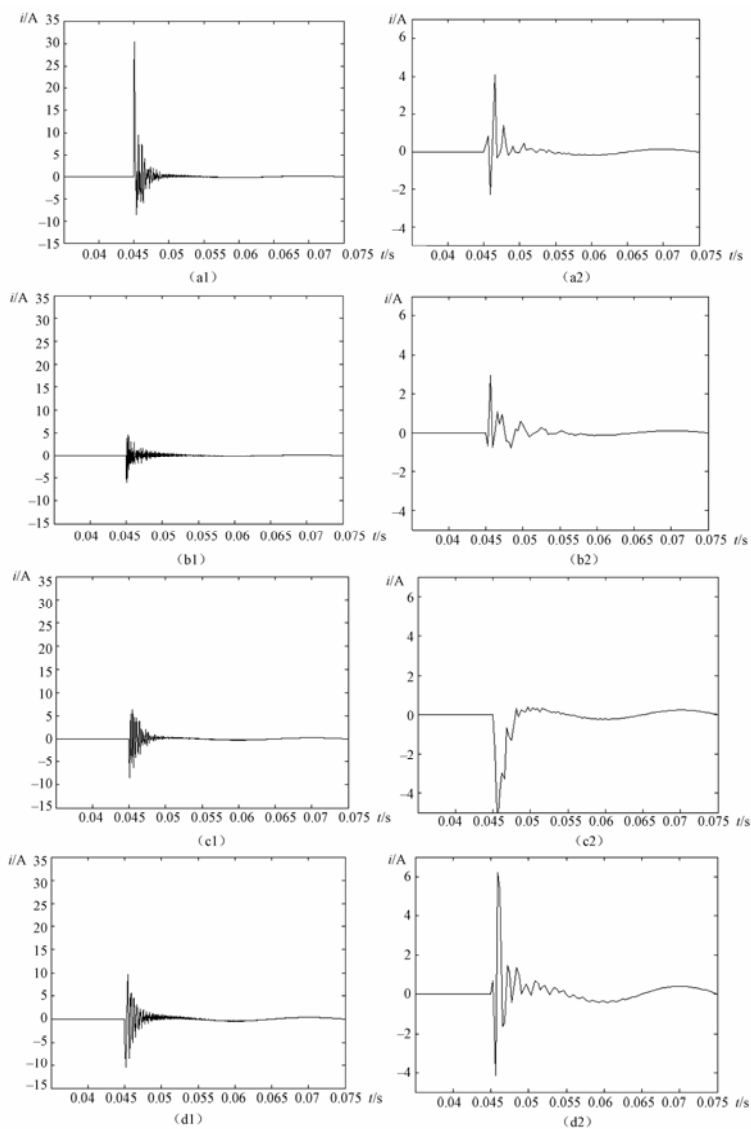


图 5-1 高频采样和低频采样的信号波形



由图 5-1 可知线路 L_1 的首波头极性和其他线路相反，分别算出 $L_1 \sim L_6$ 的高频采样信号和低频采样信号最大值的衰减比为：86.48%，50.94%，30.43%，35.29%，29.36%，40.03%，并将其离散化后，根据决策规则 $a_3b_1 \rightarrow d_4$ ， $a_3b_0 \rightarrow d_2$ ， $a_1b_0 \rightarrow d_1$ 和 $a_2b_0 \rightarrow d_1$ ，知线路 $L_1 \sim L_6$ 的暂态零序电流信号需要增强的比例系数 d 分别是：4, 2, 1, 1, 1, 1。然后，根据公式 (3-14) 对各线路的低频采样信号做增强处理。 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 增强前和增强后的信号分别如图 5-2 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-2 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

对增强的信号进行小波包分解，根据公式 (3-13) 计算各线路在各自特征频段的总能量，再根据规则 3-6 和规则 3-7 进行故障选线。增强前后的小波包分析数据 and 对应选线结果如表 5-1 所示。由表 5-1 可知，信号增强前判断为母线故障，选线结果错误；信号增强后判断 L_1 为故障线路，选线结果正确。

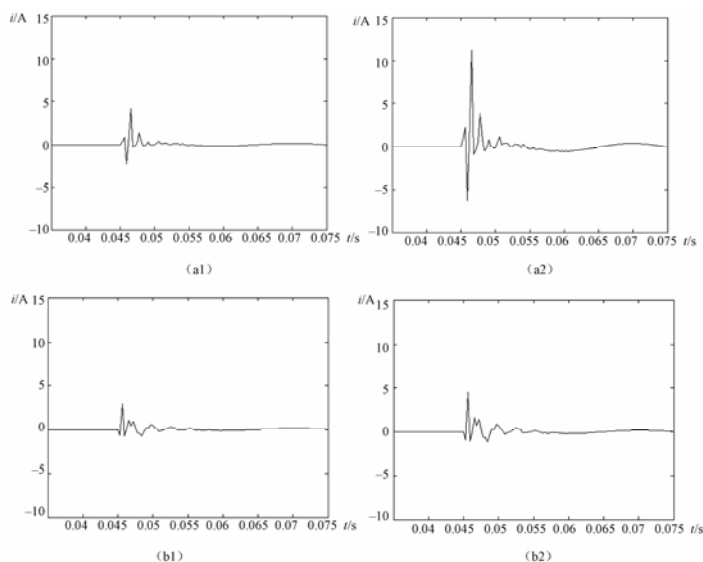


图 5-2 增强前后的信号波形

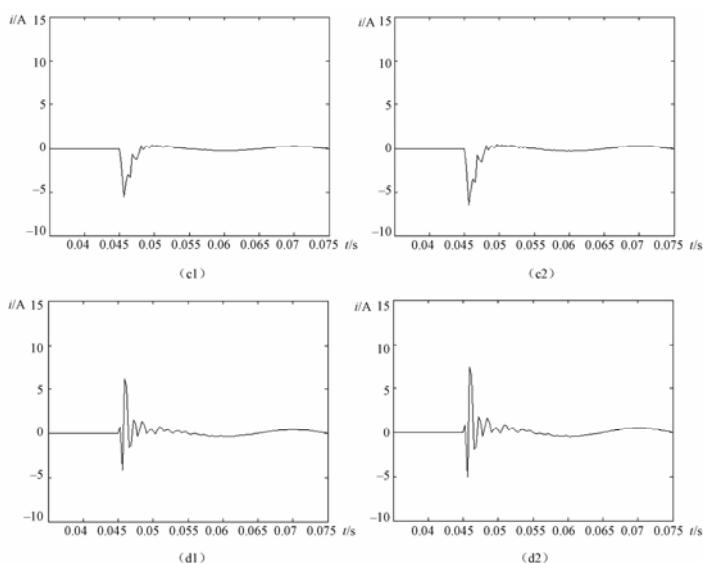


图 5-2 增强前后的信号波形 (续)

表5-1 增强前后的小波包分析数据和对应选线结果

线 路	增 强 前		选线结果	增 强 后		选线结果
	ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_{\Sigma}$		ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_{\Sigma}$	
L_1	20.0081	0.09	正常	149.0725	0.35	故障
L_2	10.7	0.05	正常	24.378	0.06	正常
L_3	28.8421	0.13	正常	38.2878	0.09	正常
L_4	47.5464	0.22	正常	65.8038	0.15	正常
L_5	46.0907	0.21	正常	60.8038	0.14	正常
L_6	63.37	0.29	正常	91.2736	0.21	正常

(2) 仿真算例 2

在相电压相位为 90° 时, 在 L_1 的 10% 处出现接地电阻为 5Ω



单相接地故障，假设 L_1 和 L_6 存在干扰，极性判据失效。 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 的高频采样和低频采样的信号分别如图 5-3 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-3 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

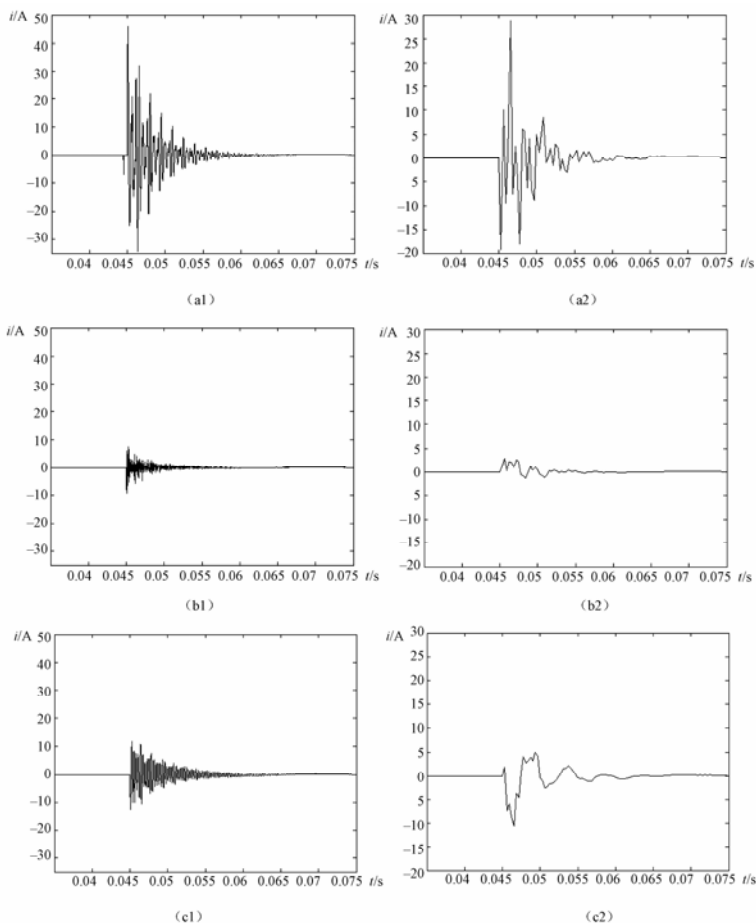


图 5-3 高频采样和低频采样的信号波形

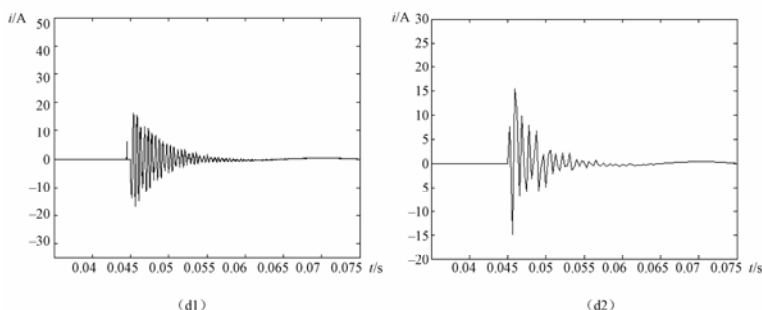


图 5-3 高频采样和低频采样的信号波形 (续)

由图 5-3 可知线路 L_6 的首波头极性和其他线路相反, 分别算出 $L_1 \sim L_6$ 的高频采样信号和低频采样信号最大值的衰减比为: 37.26%, 67.85%, 43.24%, 15.71%, 5.21%, 7.49%, 并将其离散化后, 根据决策规则 $a_2b_0 \rightarrow d_1$, $a_3b_0 \rightarrow d_2$, $a_1b_0 \rightarrow d_1$ 和 $a_1b_1 \rightarrow d_2$, 知线路 $L_1 \sim L_6$ 的零序电流信号需要增强的比例系数 d 分别是: 1, 2, 1, 1, 1, 2。然后, 根据公式 (3-14) 对各线路的低频采样的信号做增强处理。 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 增强前和增强后的信号分别如图 5-4 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-4 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

对增强的信号进行小波包分解, 根据公式 (3-13) 计算各线路在各自特征频段的总能量, 再根据规则 3-6 和规则 3-7 进行故障选线。增强前后的小波包分析数据和对应选线结果如表 5-2 所示。由表 5-2 可知, 增强前的信号经过小波包分解后, 找出能量较大的 3 条线路 L_1 、 L_5 和 L_6 , 然后比较它们的极性, 由于 L_6 的极性与其他线路相反, 所以判断 L_6 为故障线路, 选线结果错误; 信号增强后判断 L_1 为故障线路, 选线结果正确。

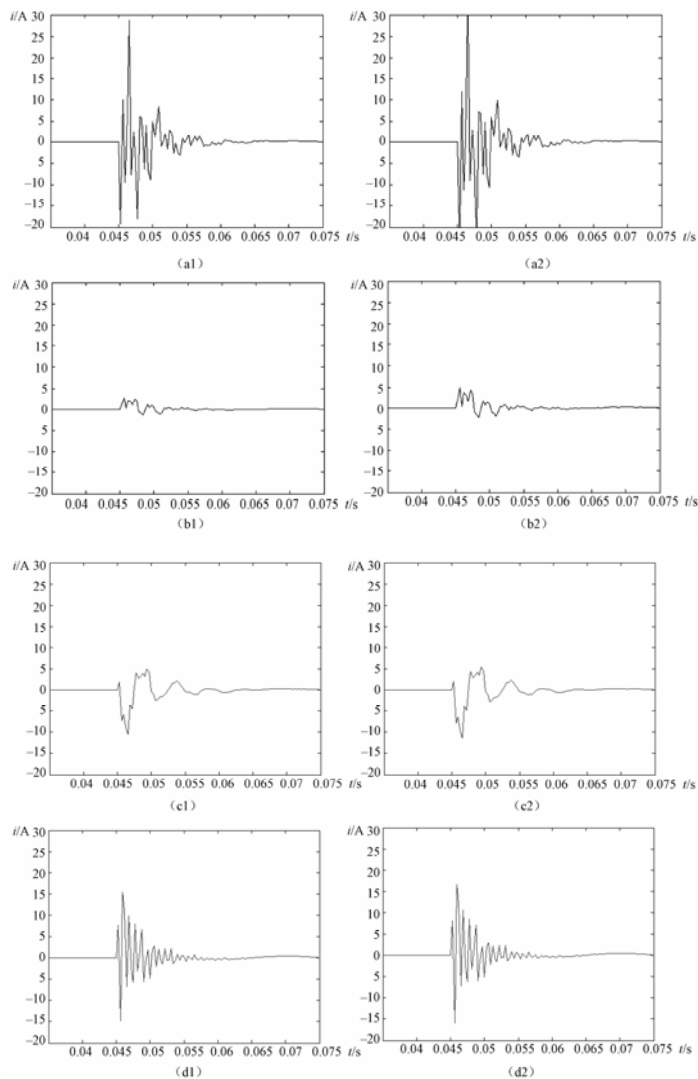


图 5-4 增强前后的信号波形



表5-2 增强前后的小波包分析数据和对应选线结果

线 路	增 强 前		选线结果	增 强 后		选线结果
	ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_Y$		ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_Y$	
L_1	1563.9	0.52	正常	2200.8	0.56	故障
L_2	27	0.01	正常	76.2	0.02	正常
L_3	87.6	0.03	正常	129.6	0.03	正常
L_4	252.3	0.08	正常	293.5	0.07	正常
L_5	318.2	0.10	正常	335	0.09	正常
L_6	781.8	0.26	故障	903.3	0.23	正常

(3) 仿真算例 3

在相电压相位为 90° 时, 母线出现接地电阻为 50Ω 单相接地故障。 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 的高频采样和低频采样的信号分别如图 5-5(a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-5 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

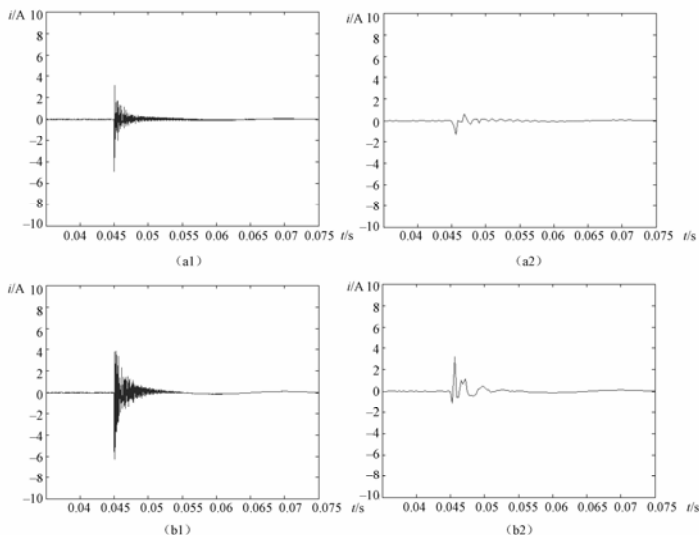


图 5-5 高频采样和低频采样的信号波形

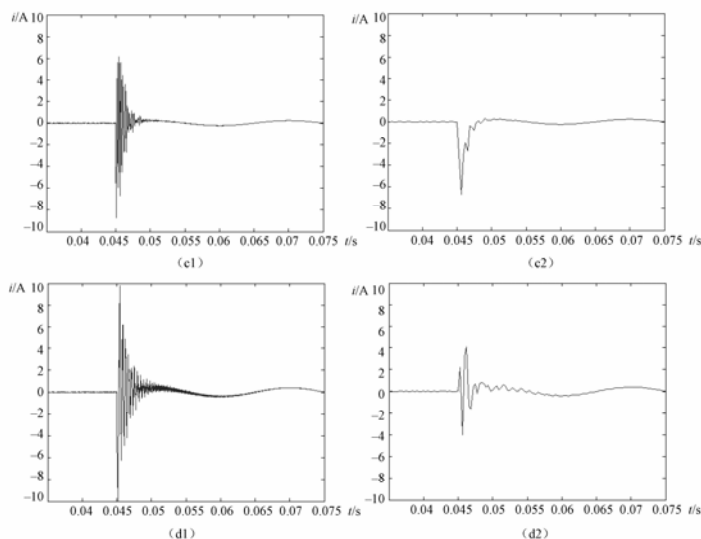


图 5-5 高频采样和低频采样的信号波形 (续)

由图 5-5 可知线路 $L_1 \sim L_6$ 的首波头极性相同, 分别算出 $L_1 \sim L_6$ 的高频采样信号和低频采样信号最大值的衰减比为: 74.82%, 48.51%, 30.08%, 23.05%, 24.44%, 60.77%, 并将其离散化后, 根据决策规则 $a_3 b_0 \rightarrow d_2$, $a_2 b_0 \rightarrow d_1$ 和 $a_1 b_0 \rightarrow d_1$, 知线路 $L_1 \sim L_6$ 的零序电流信号需要增强的比例系数 d 分别是: 2, 1, 1, 1, 1, 2。然后, 根据公式 (3-14) 对各线路的低频采样的信号做增强处理。 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 增强前和增强后的信号分别如图 5-6 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-6 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

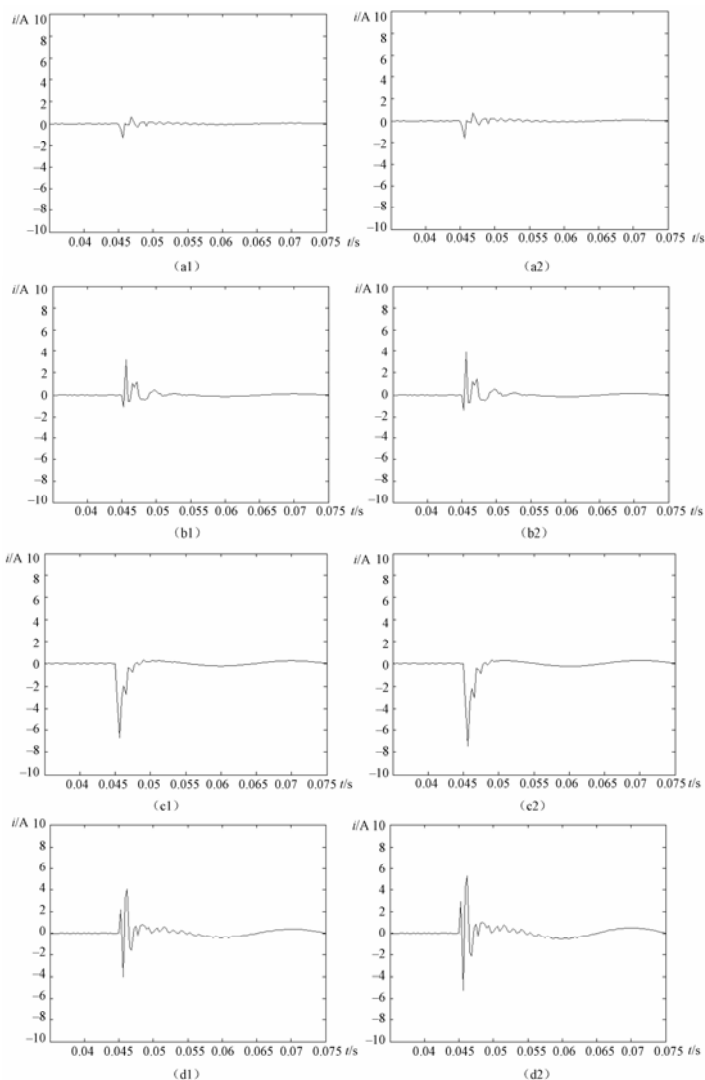


图 5-6 增强前后的信号波形



对增强的信号进行小波包分解, 根据公式 (3-13) 计算各线路在各自特征频段的总能量, 再根据规则 3-6 和规则 3-7 进行故障选线。增强前后的小波包分析数据和对应选线结果如表 5-3 所示。由表 5-3 可知, 信号增强前后均判断母线故障, 选线结果均正确。

表5-3 增强前后的小波包分析数据和对应选线结果

线 路	增 强 前		选线结果	增 强 后		选线结果
	ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_{\Sigma}$		ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_{\Sigma}$	
L_1	2.0098	0.01	正常	3.2295	0.01	正常
L_2	13.9401	0.07	正常	20.7463	0.08	正常
L_3	29.9897	0.16	正常	39.6874	0.15	正常
L_4	49.1241	0.26	正常	61.0983	0.24	正常
L_5	50.2019	0.27	正常	63.2227	0.25	正常
L_6	40.8611	0.22	正常	69.4653	0.27	正常

(4) 仿真算例 4

在相电压相位为 0° 时, 在 L_6 的 10% 处出现接地电阻为 5Ω 单相接地故障。 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 的高频采样和低频采样的信号分别如图 5-7 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-7 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

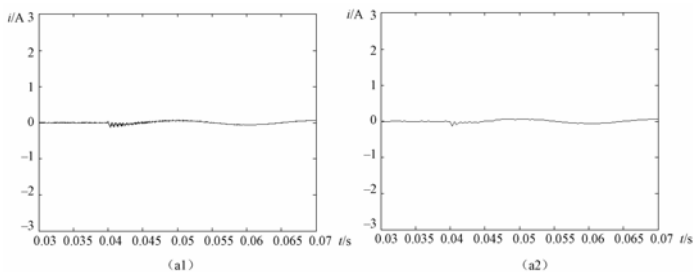


图 5-7 高频采样和低频采样的信号波形

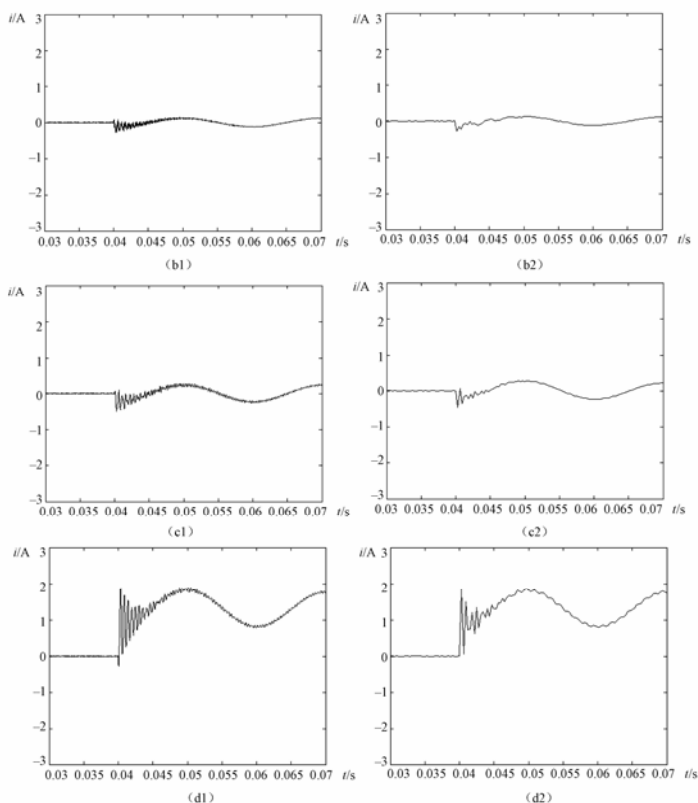


图 5-7 高频采样和低频采样的信号波形 (续)

由图 5-7 可知线路 L_6 的首波头极性和其他线路相反, 分别算出 $L_1 \sim L_6$ 的高频采样信号和低频采样信号最大值的衰减比为: 7.75%, 2.27%, 41.47%, 7.27%, 6.83%, 1.81%, 并将其离散化后, 根据决策规则 $a_1 b_0 \rightarrow d_1$, $a_2 b_0 \rightarrow d_1$ 和 $a_1 b_1 \rightarrow d_2$, 知线路 $L_1 \sim L_6$ 的零序电流信号需要增强的比例系数 d 分别是: 1, 1, 1, 1, 1, 2, 然后, 根据公式 (3-14) 对各线路的低频采样信号做增强处理。 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 增强前和增强后的信号分别如图 5-8 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-8 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

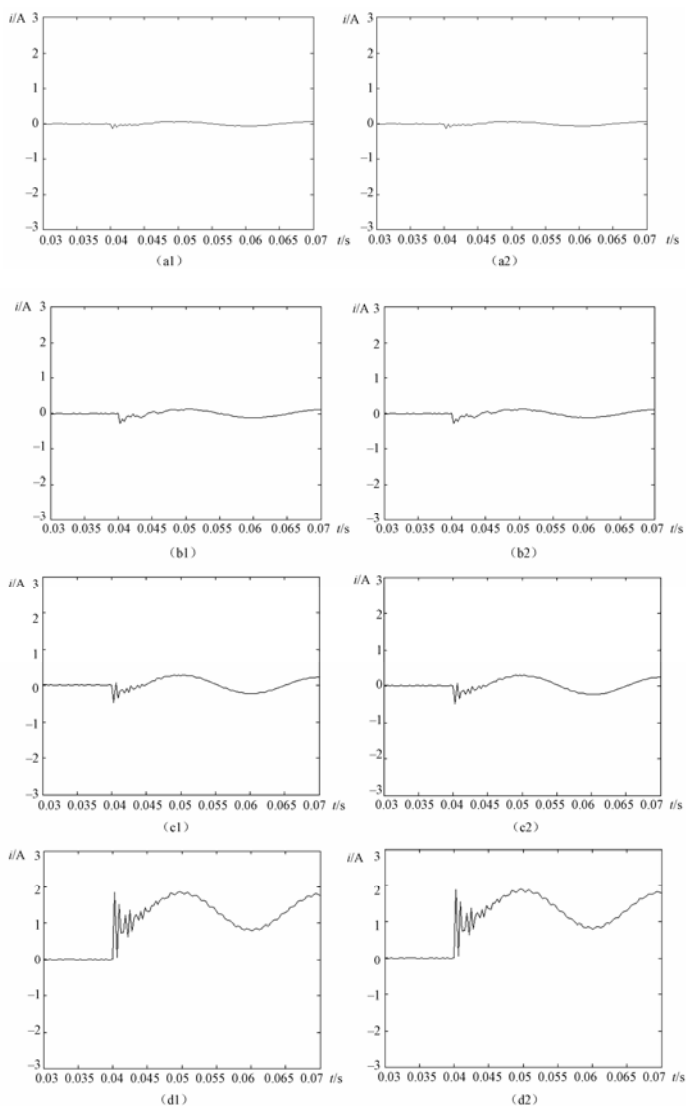


图 5-8 增强前后的信号波形



对增强后的信号进行小波包分解, 根据公式 (3-13) 计算各线路在各自特征频段的总能量, 再根据规则 3-6 和规则 3-7 进行故障选线。增强前后的小波包分析数据 and 对应选线结果如表 5-4 所示。由表 5-4 可知, 信号增强前后均判断 L_6 故障, 选线结果均正确。

表5-4 增强前后的小波包分析数据和对应选线结果

线 路	增 强 前		选线结果	增 强 后		选线结果
	ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_{\Sigma}$		ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_{\Sigma}$	
L_1	0.0175	0.01	正常	0.0172	0.01	正常
L_2	0.1001	0.03	正常	0.0987	0.03	正常
L_3	0.1062	0.04	正常	0.1548	0.05	正常
L_4	0.2499	0.08	正常	0.2684	0.08	正常
L_5	0.4749	0.16	正常	0.5079	0.16	正常
L_6	2.07	0.69	故障	2.1456	0.67	故障

(5) 仿真算例 5

在相电压相位为 90° 时, 在 L_6 的 10% 处出现接地电阻为 $2\text{k}\Omega$ 高电阻单相接地故障。 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 的高频采样和低频采样的信号分别如图 5-9 (a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-9 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

由图 5-9 可知线路 L_6 的首波头极性和其他线路相反, 分别算出 $L_1 \sim L_6$ 的高频采样信号和低频采样信号最大值的衰减比为: 16.81%, 36.31%, 39.14%, 0%, 37.82%, 44.31%, 并将其离散化后, 根据决策规则 $a_1b_0 \rightarrow d_1$, $a_2b_0 \rightarrow d_1$ 和 $a_2b_1 \rightarrow d_3$, 知线路 $L_1 \sim L_6$ 的零序电流信号需要增强的比例系数 d 分别是: 1, 1, 1, 1, 1, 3。然后, 根据公式 (3-14) 对各线路的低频采样的信号做增强处理, L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_6 增强前和增强后的信号分别如图 5-10(a1)、(b1)、(c1)、(d1) 和图 5-10 (a2)、(b2)、(c2)、(d2) 所示。

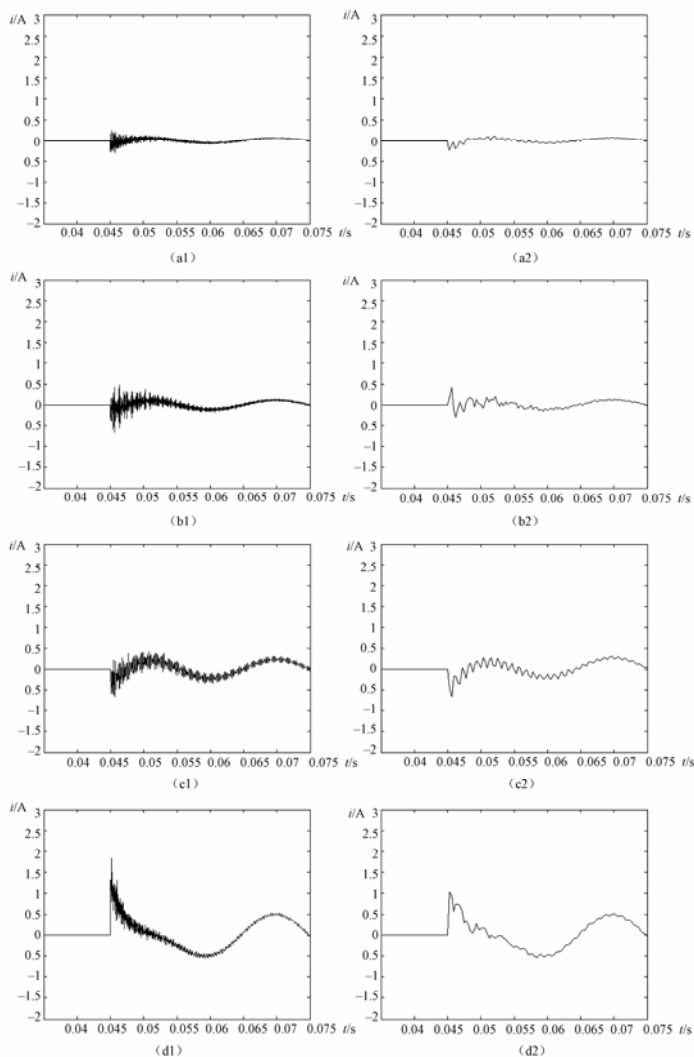


图 5-9 高频采样和低频采样的信号波形



小电流接地故障选线与定位技术

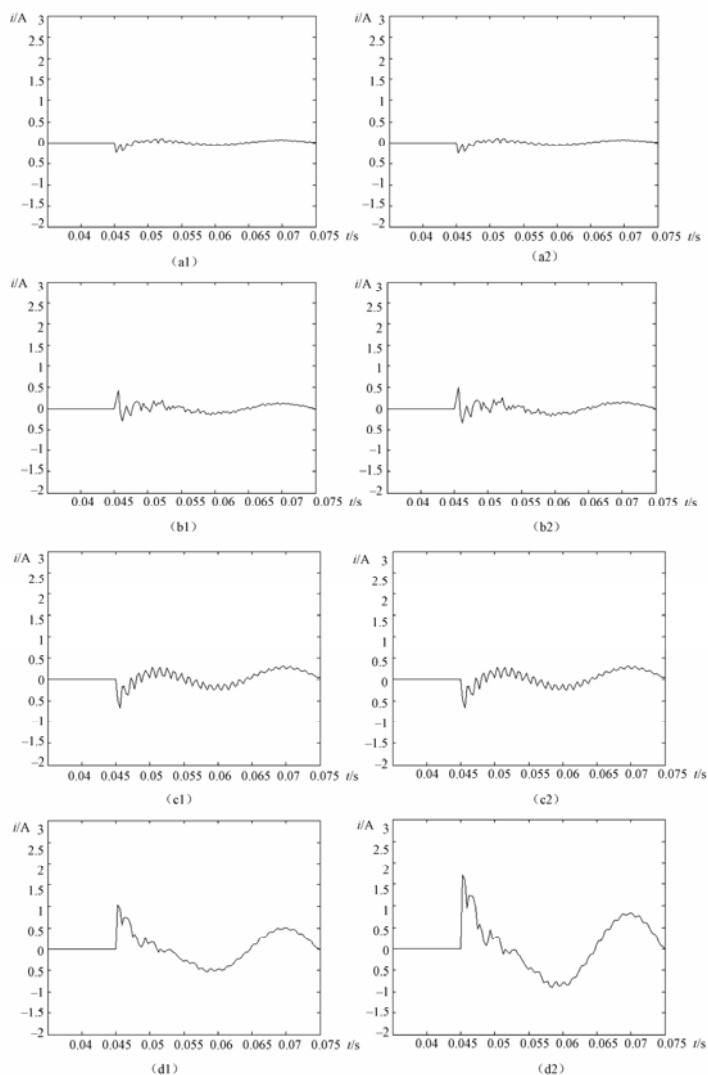


图 5-10 增强前后的信号波形



对增强的信号进行小波包分解,根据公式(3-13)计算各线路在各自特征频段的总能量,再根据规则3-6和规则3-7进行故障选线。增强前后的小波包分析数据和对应选线结果如表5-5所示。由表5-5可知,信号增强前后均判断线路 L_6 故障,选线结果均正确。

表5-5 增强前后的小波包分析数据和对应选线结果

线 路	增 强 前		选线结果	增 强 后		选线结果
	ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_{\Sigma}$		ε_k	$\varepsilon_k/\varepsilon_{\Sigma}$	
L_1	0.1216	0.03	正常	0.1305	0.02	正常
L_2	0.4706	0.11	正常	0.6494	0.08	正常
L_3	0.7023	0.17	正常	1.0041	0.13	正常
L_4	0.9756	0.23	正常	0.9756	0.13	正常
L_5	0.1846	0.04	正常	0.261	0.03	正常
L_6	1.7029	0.41	故障	4.7191	0.61	故障

由前面的分析可知,基于粗糙集信号增强的小波包选线算法在小波包选线方法失效、极性判别法失效、母线故障、在相电压相位为 0° 时的接地故障和高阻接地故障的情况下,均能正确选出故障线路,因而选线准确度高于小波包选线方法。

5.3 基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线方法验证

5.3.1 基于粗糙集理论的融合选线方法验证

(1) 仿真验证

根据4.5.2节(1)中进行各种单相接地故障试验,其中的测试样本数据如表5-6所示。利用测试样本分别对基于粗糙集理论的融合选线方法、基于小波包的选线方法、有功分量选线方法和五



次谐波选线方法进行测试，测试结果如表 5-7 所示。测试结果表明基于粗糙集理论的融合选线方法的正确率最高。

表5-6 测试样本数据

零序电流 信号编号	小波包方法			有功分量法			五次谐波法			基波
	$X_{mp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{mp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{mp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_p(k)$
1	0.9894	1.0000	0.9894	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-0.9660
2	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000
3	-1.0000	0.9954	-0.9954	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9283
4	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.8213
5	-0.7156	1.0000	-0.7156	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.7140
6	-0.5216	1.0000	-0.5216	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.5350
...
1723	0.6381	1.0000	0.6381	0.2616	0.1473	0.0386	0.0000	0.0216	0.0000	-0.9575
1724	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.7446	0.1473	-0.1097	-1.0000	0.0216	-0.0216	-1.0000
1725	-0.9467	1.0000	-0.9467	-0.4898	0.1473	-0.0722	-0.9332	0.0216	-0.0201	-0.9295
1726	-0.8168	1.0000	-0.8168	-0.2118	0.1473	-0.0356	-0.8270	0.0216	-0.0178	-0.8228
1727	-0.6597	1.0000	-0.6597	0.0000	0.1473	0.0000	-0.7198	0.0216	-0.0155	-0.7160
1728	-0.2999	1.0000	-0.2999	0.0000	0.1473	0.0000	-0.5561	0.0216	-0.0120	-0.5378

表5-7 各种选线方法的正确度

	粗糙集方法	小波包方法	有功分量法	五次谐波法
选线正确率	0.9907	0.9421	0.6869	0.8536

(2) 现场验证

利用山东淄博科汇电气股份有限公司生产的 XJ—100 型小电流接地系统故障选线装置采集到的 100 个单相接地故障时的数据



作为现场数据,对该模型进行验证,验证结果表明,选线正确率为100%。其中,5个典型的实际数据波形见附录。针对5种故障情况,计算出的各种故障测度和利用粗糙集选线模型得到的选线结果分别如表5-8~表5-12所示。

表5-8 竹园站2004年12月18日I09发生单相接地故障时
各线路的粗糙集选线模型输出

线路	小波包方法				有功分量法				五次谐波法				模型输出	线路状态
	$X_m(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	a	$X_m(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	b	$X_m(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	c		
I09	1.0000	1.0000	1.0000	5	0.7801	1.0000	0.7801	5	0.9423	1.0000	0.9423	5	2	故障
I10	-0.5933	1.0000	-0.5933	1	0.0000	1.0000	0.0000	3	-0.6475	1.0000	-0.6475	1	1	正常
I14	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.5938	1.0000	-0.5938	1	0.0000	1.0000	0.0000	3	1	正常
I15	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.8311	1.0000	-0.8311	1	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正常
I16	-0.9368	1.0000	-0.9368	1	-0.2110	1.0000	-0.2110	3	-0.9351	1.0000	-0.9351	1	1	正常

表5-9 竹园站2005年4月16日I09发生单相接地故障时
各线路的粗糙集选线模型输出

线路	小波包方法				有功分量法				五次谐波法				模型输出	线路状态
	$X_m(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	a	$X_m(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	b	$X_m(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	c		
I09	1.0000	1.0000	1.0000	5	0.2144	1.0000	0.2144	3	0.2144	1.0000	0.2144	3	2	故障
I10	-0.5336	1.0000	-0.5336	1	0.0000	1.0000	0.0000	3	0.0000	1.0000	0.0000	3	1	正常
I14	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.6903	1.0000	-0.6903	1	-0.6903	1.0000	-0.6903	1	1	正常
I15	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	0.0000	1.0000	0.0000	3	0.0000	1.0000	0.0000	3	1	正常
I16	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.0596	1.0000	-0.0596	3	-0.0596	1.0000	-0.0596	3	1	正常



表5-10 清濛变2005年5月18日I14发生单相接地故障时
各线路的粗糙集选线模型输出

线路	小波包方法			a	有功分量法			b	五次谐波法			c	模型输出	线路状态
	$X_{rp}(k)$	$X_{qp}(k)$	$X_p(k)$		$X_{rp}(k)$	$X_{qp}(k)$	$X_p(k)$		$X_{rp}(k)$	$X_{qp}(k)$	$X_p(k)$			
I09	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.6045	1.0000	-0.6045	1	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正常
I10	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.7906	1.0000	-0.7906	1	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正常
I11	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.5719	1.0000	-0.5719	1	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正常
I12	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.5776	1.0000	-0.5776	1	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正常
I14	1.0000	1.0000	1.0000	5	0.2074	1.0000	0.2074	3	1.0000	1.0000	1.0000	5	2	故障
I18	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.3618	1.0000	-0.3618	2	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正常
I19	-0.9825	1.0000	-0.9825	1	-0.1655	1.0000	-0.1655	3	-0.9099	1.0000	-0.9099	1	1	正常
I20	-0.9317	1.0000	-0.9317	1	-0.1023	1.0000	-0.1023	3	-0.8160	1.0000	-0.8160	1	1	正常



表5-11 清濛变2005年9月30日I14发生单相接地故障时

各线路的粗糙集选线模型输出

线路	小波包方法				有功分量法				五次谐波法				模 型 输 出	线 路 状 态
	$X_{\eta p}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	a	$X_{\eta p}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	b	$X_{\eta p}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	c		
I09	-0.9596	1.0000	-0.9596	1	-0.3142	1.0000	-0.3142	2	0.0000	1.0000	0.0000	3	1	正 常
I10	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.2444	1.0000	-0.2444	3	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正 常
I11	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.2444	1.0000	-0.2444	3	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正 常
I12	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.2444	1.0000	-0.2444	3	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正 常
I14	1.0000	1.0000	1.0000	5	0.0000	1.0000	0.0000	3	0.3543	1.0000	0.3543	4	2	故 障
I18	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-0.5377	1.0000	-0.5377	1	-0.2908	1.0000	-0.2908	3	1	正 常
I19	-0.9910	1.0000	-0.9910	1	-0.1327	1.0000	-0.1327	3	-0.7853	1.0000	-0.7853	1	1	正 常
I20	-0.9427	1.0000	-0.9427	1	-0.3142	1.0000	-0.3142	2	-0.8105	1.0000	-0.8105	1	1	正 常



表5-12 潮湖变2004年10月24日I18发生单相接地故障时各线路的粗糙集选线模型输出

线路	小波包方法				有功分量法				五次谐波法				模型输出	线路状态
	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	a	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	b	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	c		
I10	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	-1.0000	1.0000	-1.0000	1	1	正常
I17	-0.3074	1.0000	-0.3074	2	0.0000	1.0000	0.0000	3	-0.6326	1.0000	-0.6326	1	1	正常
I18	0.7857	1.0000	0.7857	5	0.6108	1.0000	0.6108	5	0.9041	1.0000	0.9041	5	2	故障
I19	-0.4756	1.0000	-0.4756	2	0.0000	1.0000	0.0000	3	-0.7172	1.0000	-0.7172	1	1	正常

仿真和现场数据均证明了基于粗糙集理论的融合选线模型的选线准确度高于基于单一故障特征的故障选线方法，因而该选线方法正确有效。

5.3.2 基于神经网络的融合选线方法验证

(1) 仿真验证

利用 5.3.1 节 (1) 中的测试数据对基于神经网络的融合选线模型进行验证，验证结果表明选线正确率为 99.94%，该方法的选线准确度高于基于粗糙集理论的融合选线方法。

(2) 现场验证

同样利用山东淄博科汇电气股份有限公司生产的 XJ—100 型小电流接地系统故障选线装置采集到的 100 个单相接地故障时的数据作为现场数据对该模型进行验证，验证结果表明，选线正确率为 100%。针对附录中的 5 种典型故障，计算出的各种故障测



度和利用神经网络选线模型得到的选线结果分别如表 5-13~表 5-17 所示。

表5-13 竹园站2004年12月18日I09发生单相接地故障时各线路的神经网络选线模型输出

线路	小波包方法			有功分量法			五次谐波法			模型输出	线路状态
	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$		
I09	1.0000	1.0000	1.0000	0.7801	1.0000	-0.7801	0.9423	1.0000	0.9423	0.9986	故障
I10	-0.5933	1.0000	-0.5933	0.0000	1.0000	0.0000	-0.6475	1.0000	-0.6475	-1.0003	正常
I14	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.5938	1.0000	-0.5938	0.0000	1.0000	0.0000	-1.0006	正常
I15	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.8311	1.0000	-0.8311	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9972	正常
I16	-0.9368	1.0000	-0.9368	-0.2110	1.0000	-0.2110	-0.9351	1.0000	-0.9351	-0.9997	正常

表5-14 竹园站2005年4月16日I09发生单相接地故障时各线路的神经网络选线模型输出

线路	小波包方法			有功分量法			五次谐波法			模型输出	线路状态
	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$		
I09	1.0000	1.0000	1.0000	0.2144	1.0000	0.2144	0.2144	1.0000	0.2144	1.0000	故障
I10	-0.5336	1.0000	-0.5336	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	-1.0072	正常
I14	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.6903	1.0000	-0.6903	-0.6903	1.0000	-0.6903	-0.9977	正常
I15	-1.0000	1.0000	-1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	-1.0011	正常
I16	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.0596	1.0000	-0.0596	-0.0596	1.0000	-0.0596	-1.0007	正常

表5-15 清濛变2005年5月18日I14发生单相接地故障时各线路的神经网络选线模型输出

线路	小波包方法			有功分量法			五次谐波法			模型输出	线路状态
	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$		
I09	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.6045	1.0000	-0.6045	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9977	正常



续表

线路	小波包方法			有功分量法			五次谐波法			模型	线路
	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	输出	状态
I10	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.7906	1.0000	-0.7906	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9973	正常
I11	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.5719	1.0000	-0.5719	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9978	正常
I12	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.5776	1.0000	-0.5776	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9978	正常
I14	1.0000	1.0000	1.0000	0.2074	1.0000	0.2074	1.0000	1.0000	1.0000	0.9995	故障
I18	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.3618	1.0000	-0.3618	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9986	正常
I19	-0.9825	1.0000	-0.9825	-0.1655	1.0000	-0.1655	-0.9099	1.0000	-0.9099	-0.9996	正常
I20	-0.9317	1.0000	-0.9317	-0.1023	1.0000	-0.1023	-0.8160	1.0000	-0.8160	-1.0003	正常

表5-16 清濛变2005年9月30日I14发生单相接地故障时各线路的神经网络选线模型输出

线路	小波包方法			有功分量法			五次谐波法			模型	线路
	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	输出	状态
I09	-0.9596	1.0000	-0.9596	-0.3142	1.0000	-0.3142	0.0000	1.0000	0.0000	-1.0009	正常
I10	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.2444	1.0000	-0.2444	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9992	正常
I11	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.2444	1.0000	-0.2444	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9992	正常
I12	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.2444	1.0000	-0.2444	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9992	正常
I14	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.3543	1.0000	0.3543	1.0006	故障
I18	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.5377	1.0000	-0.5377	-0.2908	1.0000	-0.2908	-0.9989	正常
I19	-0.9910	1.0000	-0.9910	-0.1327	1.0000	-0.1327	-0.7853	1.0000	-0.7853	-0.9997	正常
I20	-0.9427	1.0000	-0.9427	-0.3142	1.0000	-0.3142	-0.8105	1.0000	-0.8105	-0.9990	正常



表5-17 潮湖变2004年10月24日I18发生单相接地故障时各线路的神经网络

选线模型输出

线路	小波包方法			有功分量法			五次谐波法			模型输出	线路状态
	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$	$X_{rp}(k)$	$X_{ap}(k)$	$X_p(k)$		
I10	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-1.0000	1.0000	-1.0000	-0.9971	正常
I17	-0.3074	1.0000	-0.3074	0.0000	1.0000	0.0000	-0.6326	1.0000	-0.6326	-1.0093	正常
I18	0.7857	1.0000	0.7857	0.6108	1.0000	0.6108	0.9041	1.0000	0.9041	0.9992	故障
I19	-0.4756	1.0000	-0.4756	0.0000	1.0000	0.0000	-0.7172	1.0000	-0.7172	-1.0061	正常

仿真和现场数据均证明了基于神经网络的融合选线模型的选线准确度较高,因而该方法正确有效。同时,也验证了基于神经网络的融合选线方法的选线准确度高于基于粗糙集理论的融合选线方法。因此,将基于神经网络的融合选线方法作为小电流接地故障选线装置的选线判据。

5.4 本章小结

通过电磁暂态仿真软件 EMTP-ATP 验证了基于粗糙集信号增强的小波包选线算法在小波包选线方法失效、极性判别法失效、母线故障、在相电压相位为 0° 时接地故障和高阻接地故障等五种容易造成选线误动作的故障情况下,均能正确选出故障线路,因而该方法的选线准确度高于小波包选线方法。

通过仿真验证了基于粗糙集理论的融合选线方法和基于神经网络的融合选线方法均具有较高的选线准确度,但是基于神经网络的融合选线方法具有更高的选线准确度。通过现场数据验证了基于粗糙集理论的融合选线方法和基于神经网络的融合选线方法均能 100%地选出故障线路。因此,小电流接地故障选线装置应采用基于神经网络的融合选线方法作为选线判据。

第 6 章 小电流接地故障选线装置设计

针对传统的基于单一判据的选线装置存在选线准确度低的问题，提出了基于神经网络的多判据融合选线装置方案。给出了系统的整体结构、部分硬件和软件的设计方案。

6.1 小电流接地故障选线装置的总体结构

传统的故障选线装置大多是基于单一判据的选线装置，存在选线准确度低和鲁棒性差等缺点。近年来，随着半导体工艺和计算机技术的发展，数字信号处理器 DSP (Digital Signal Processor)、现场可编程门阵列 FPGA (Field Programmable Gate Array) 等现代信号处理芯片越来越成熟和普遍使用，使得高速数据采集技术的实现成为可能。

本故障选线装置主要由上位机和下位机组成，系统的结构框图如图 6-1 所示。其中，下位机由 DSP+FPGA 组成，主要实现数据采集和与上位机通信。DSP 主要实现将故障数据存储和上传至上位机；FPGA 主要实现低速和高速数据采集、数据循环存储、单相接地故障检测以及各种逻辑控制。零序电流信号来自安装在各馈线的零序电流互感器的二次侧，经负载电阻转换成电压信号，再经放大和 3kHz 的低通滤波后，分别经过低频和高频采样保持器得到相应的暂态零序电流信号和稳态零序电流信号。低频采样的信号经多路开关和 A/D 变换后由 FPGA 控制循环存入静态 RAM 中。高频采样的信号经多路开关和 A/D 变换后，由 FPGA 控制循



环存入 FPGA 的内部双口 RAM 中。测频的标准信号取自电网的线电压，先经变压器隔离，再经保护和低通滤波器后，由 FPGA 实现测频功能。零序电压来自电压互感器二次开口三角，经隔离变压器变为合适的电压信号，再经保护电路、3kHz 的低通滤波器后，一路输入到 FPGA 进行逻辑判断，实时检测电网是否发生了单相接地故障。当发生单相接地故障时，FPGA 输出一触发信号，通知 DSP 从循环存储器中取出一定长度的故障数据，存入 DSP 的外部 RAM 中，然后将该数据上传至上位机，进行故障选线；另一路经多路开关和 A/D 变换后，作为低频采样信号存入循环存储器中。

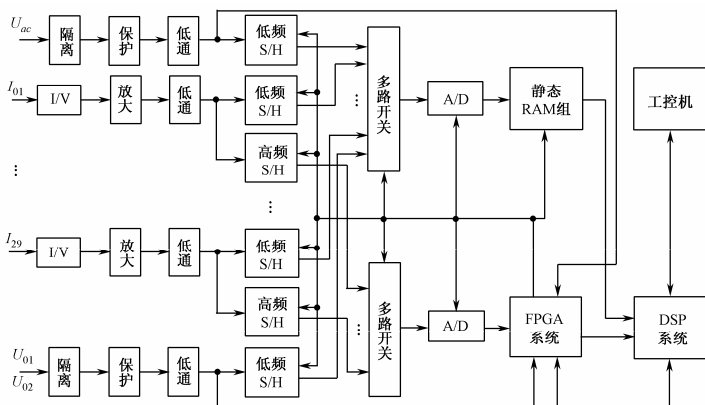


图 6-1 故障选线装置总体结构框图

6.2 硬件设计

6.2.1 数据采集单元

系统设计为 29 路零序电流数据采集通道，每个数据采集通道又分为高速数据采集和低速数据采集两部分。另外还有两路零序电压数据采集通道和一路线电压数据采集通道，它们都采用低频



采样。为了实现对故障线路的准确判断,要求对采集到的各馈线的零序电流信号和零序电压信号是同一时刻的信号,因而需要对信号进行同时采样。因为需要同时采样的信号路数较多,为了简化电路,本装置采用同时采样、分时转换的方法。通过 FPGA 控制采样保持器实现同时采样,然后由 FPGA 控制多路开关将各路采样的信号切换到 A/D 转换器中实现分时转换。

(1) 低速数据采集

低频采样的采样频率取为 3.2kHz ,因而要求低频采样保持器的采样频率大于 3.2kHz 。因为装置共有 32 路低频采样的信号, $3.2\text{kHz} \times 32 = 102.4\text{kHz}$,要求模拟开关的开关速度和 A/D 转换速度大于 102.4kHz 。

(2) 高速数据采集

高频采样的采样频率取为 51.2kHz ,因而要求高频采样保持器的采样频率大于 51.2kHz 。因为装置共有 29 路高频采样的信号, $51.2\text{kHz} \times 29 = 1484.8\text{kHz}$,要求模拟开关的开关速度和 A/D 转换速度大于 1484.8kHz 。

6.2.2 数据存储单元

数据存储包括低频采样数据的循环存储、高频采样数据的循环存储和故障数据存储。由 FPGA 控制实时对电压和电流信号进行采集,其中高频采样的零序电流信号,经多路开关和 A/D 转换后,由 FPGA 控制循环存储在其内部的双口 RAM 中。当发生单相接地故障时,由 DSP 从双口 RAM 中读出从故障前 $1/12$ 个周波到故障后 $1/6$ 个周波共 $1/4$ 个周波的数据。从而实现了高频采样数据的无缝采集。低频采样的零序电流、零序电压和线电压信号,经多路开关和 A/D 转换后,由 FPGA 控制循环存储到静态 SRAM A 中。当发生单相接地故障时,由 FPGA 控制在静态 RAM A 中存储



6.2.3 DSP系统

本装置的 DSP 选用 Freescale 公司混合型控制器芯片 56F8346。它融合了数字信号处理器和微控制器的优点，其内部集成了丰富的资源，如 Flash、UART 和 CAN 等，满足了小电流接地故障选线装置对数据采集和通信的要求。另外，Freescale 还提供了两个有力的软件开发工具。一个是 CodeWarrior 集成开发环境（IDE），它集成了 C 编译器、汇编和连接器、烧片器、连接、调试、内核仿真及实时调试等多种操作，不需要其他工具就可以方便地完成 DSP 的应用开发。另一个软件开发工具是 PE（Processor Expert），为用户的开发环境提供了嵌入在 CodeWarrior 中的软件包和应用实例，提供了外设模块的驱动程序和接口。它允许程序员创建自己的 C 应用程序代码，而不用考虑硬件组成结构，这使得一些对 DSP 芯片的内部结构即硬件不是很熟悉的开发人员也能够快速地开发。

6.2.4 FPGA系统

根据装置对控制逻辑和存储单元的要求，FPGA 选用 Altera 公司 Cyclone 系列中的 EP1C12 TC240，它内含 12060 个逻辑单元（LE），52 个 M4K RAM 块，可以提供约 30K 字节的 RAM 容量，2 个锁相环，240 个 I/O 脚，其中 173 个可用脚。为了实现对数据的无缝采集，将 FPGA 内部的 RAM 设计成双口 RAM 结构。

6.2.5 通信端口

当发生单相接地故障后，DSP 要将故障数据高速传送到上位机执行选线算法，要求通信速度快，且抗干扰能力强。因而本装置采用 RS-485 通信接口。RS-485 通信接口抗干扰能力强，不易受电磁干扰影响；RS-485 通信接口传输速度快，复杂驱动能力强，



在传输距离为 120m 时,最大传输速率为 10Mbit/s;若采用 90Kbit/s,传输距离可达 1200m。

6.3 软件设计

首先,在工业 PC 上根据变电站实际情况,通过 ATP 仿真软件对可能发生的各种故障进行仿真,对仿真数据分别采用小波包分析法、有功分量和五次谐波法提取暂态、有功分量和五次谐波分量故障特征,并计算出各种故障特征的故障测度。用这些数据对神经网络进行训练,训练完成后得到神经网络模型,利用该模型对现场采集的数据进行故障判断,实现故障选线。

故障选线系统在常态下由下位机实时采集电网中的零序电压和各线路的零序电流,通过零序电压判断电网状态。当发生单相接地故障时,下位机低速采集 8 个周波的零序电压和零序电流信号,并高速采集 1/4 个周波的零序电流信号。然后将这些数据上传至上位机,进行故障选线。上位机接收到高频采样和低频采样的信号,提取每条线路的 2 个周波的低频采样的暂态零序电流信号和 1/4 个周波的高频采样的暂态零序电流信号,分别计算出低频采样的信号的幅值衰减程度和高频采样的信号的首波头极性,根据式(3-24)对各线路的低频采样的 2 个周波信号进行增强处理,对增强后的信号利用小波包分析方法提取暂态故障特征。同时选取故障后一个周波的稳态零序电流信号,利用 FFT 算法分别提取各线路零序电流的有功分量和五次谐波分量。分别算出各线路每种故障特征的故障测度,利用神经网络模型对三种选线结果进行智能融合,从而得到融合后的故障选线结果。基于神经网络的故障选线装置的上位机软件流程如图 6-3 所示。

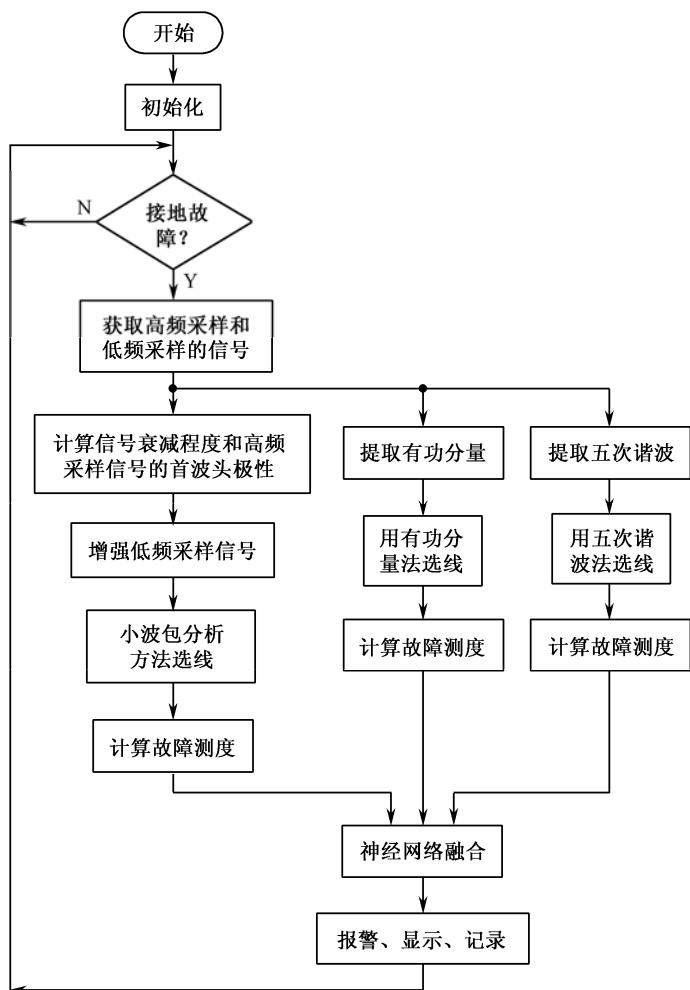


图 6-3 故障选线装置的上位机软件流程图



6.4 本章小结

本章针对基于神经网络的选线方法，设计出了小电流接地故障选线装置的方案。本装置的下位机采用 CPU+FPGA 的结构，可以满足系统对零序电流进行高速和低速采集的要求，复杂的选线算法由工控机来实现。本章重点给出了系统的总体结构和主要硬件模块方案设计，实现了对数据的无缝采集；同时介绍了本装置的主要软件流程。

第 7 章 基于暂态特征信息的小电流 接地故障定位方法研究

本章给出了复合导纳法小电流接地故障定位方法。分析了该方法应用于故障定位的可行性，给出了定位判据及其优缺点。本章还给出了传统定位方法与本章提出的定位方法在诸多方面的性能比较。

7.1 暂态 0 模电流特征分析

7.1.1 故障点同侧暂态 0 模电流特征分析

小电流接地故障时，相当于在故障点附加一个虚拟电源。在图 7-1 所示的小电流接地故障 0 模网络中，故障线路故障点上游的检测点 M （或 N ）检测到的暂态 0 模电流为检测点 M （或 N ）到母线段以及健全线路的对地电容电流之和。

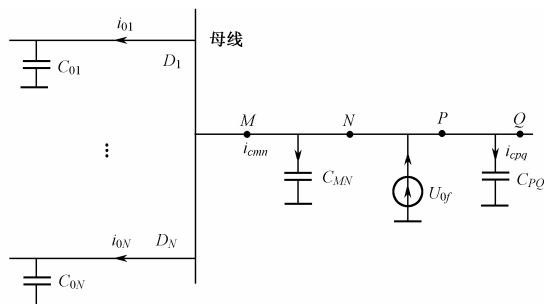


图 7-1 小电流接地故障 0 模网络图



在图 7-1 所示的网络中,检测点 M 检测到的暂态 0 模电流为:

$$i_M = i_{BM} + i_H \quad (7-1)$$

式中: i_{BM} 为母线到 M 点对地电容电流, i_H 为所有健全线路暂态 0 模电流之和。

N 点检测到的暂态 0 模电流为:

$$i_N = i_{BN} + i_H = i_{BM} + i_{NM} + i_H \quad (7-2)$$

式中: i_{BN} 为母线到 N 点对地电容电流, i_{NM} 为 M 点到 N 点线路对地电容电流。

M 、 N 检测点的电流之差为:

$$i_N - i_M = i_{cmm} \quad (7-3)$$

同理,对于故障线路故障点下游的检测点 P (或 Q) 检测到的暂态 0 模电流为检测点 P (或 Q) 到线路末端的对地电容电流。故障点下游的检测点检测到的暂态 0 模电流之差为:

$$i_P - i_E = i_{cpq} \quad (7-4)$$

对于故障点上游(或下游)的任意两个相邻的检测点,其暂态 0 模电流之差为两检测点之间区段对地分布电容电流。由于该电容电流较小,两相邻检测点的暂态 0 模电流幅值差异不大,波形形状基本相同。

7.1.2 故障点两侧暂态 0 模电流特征分析

根据图 2-13 所示的基于 π 型电路的小电流接地 0 模网络,故障点上游暂态 0 模电流为故障点至母线段及健全线路在 0 模电源的作用下的暂态响应,故障点下游暂态 0 模电流为故障点至负荷段线路在 0 模电源的作用下的暂态响应。由于故障点两侧 0 模网络参数不同,两侧暂态 0 模电流波形相差较大。

故障点上游 0 模网络可看做所有健全线路并联后再与故障点至母线段线路串联。0 模电容为故障点至母线段线路及所有健全线路对地电容之和,可表示为:



$$C_{0b1} = \frac{1}{2}(C_{01} + C_{02} + \cdots + C_{0N} + C_{f0b}) \quad (7-5)$$

故障点上游 0 模电感可表示为：

$$L_{0b} = L_{01} // L_{02} // \cdots // L_{0N} + L_{f0b} \quad (7-6)$$

式中： C_{01} 、 C_{02} 、 C_{0N} 为健全线路 1、2、N 的 0 模电容； L_{01} 、 L_{02} 、 L_{0N} 为健全线路 1、2、N 的 0 模电感； C_{f0b} 、 L_{f0b} 为故障点至母线路段的 0 模电容与 0 模电感。

故障点下游 0 模电容、0 模电感为故障点至负荷段线路对地电容和 0 模电感。

对于多条出线的配电系统，一般情况下有：

$$\omega_n \neq \omega'_n \quad (7-7)$$

式中： ω_n 为故障点上游系统主谐振频率； ω'_n 为故障点下游系统主谐振频率。

故障点上游系统的线路总长度（包括健全线路）远远大于下游系统，相应地其对地分布电容也远远大于后者。对于故障点上游系统 0 模电感，根据式（7-6），有：

$$L_{0b} < L_{\min} + L_{f0b} \quad (7-8)$$

式中： L_{\min} 为 L_{01} 、 $L_{02} \cdots L_{0N}$ 的最小值。

当故障点离母线很近，且其中一条健全出线的 0 模电感很小，此时可能故障点上游 0 模电感远小于故障点下游 0 模电感，该点处可能存在：

$$\omega_n = \omega'_n \quad (7-9)$$

在概率很小时存在两侧系统主谐振频率相同的情况。但是暂态 0 模电流信号除主谐振信号外，还包含次谐振频率及其他频率信号。由于故障点两侧系统不同，即使主谐振频率相同，暂态 0 模电流也不完全相同，两侧暂态 0 模电流信号波形相差较大。暂态 0 模电流频谱图参见图 2-15。



7.2 基于复合导纳的小电流接地故障定位方法

7.2.1 单一频率 0 模导纳及其不足

小电流接地故障时，线路中的暂态 0 模电流分布不同，幅值相差较大，若仅以暂态 0 模电流作为装置启动和故障判据，会存在一些问题。发生接地故障时，整个线路中的 0 模电压基本相同，且故障时工频及暂态 0 模电压变化明显。利用暂态 0 模电压和暂态 0 模电流共同作为故障判据，会提高故障定位的可靠性。因此，研究一种同时利用暂态 0 模电压和暂态 0 模电流的故障检测方法具有重要的价值。

参考 2.5 节对小电流接地故障频域特性的分析，在 SFB 频段内，所有线路入端阻抗均成容性，可以用集中参数电容代替，SFB 频段内 0 模网络结构图如图 2-21 所示。

单一频率为 ω 的 0 模导纳 $\dot{Y}_0(j\omega)$ 可表示为：

$$\dot{Y}_0(j\omega) = \frac{\dot{I}_{0\omega}}{\dot{U}_{0\omega}} \quad (7-10)$$

式中： $\dot{U}_{0\omega}$ 、 $\dot{I}_{0\omega}$ 为频率为 ω 的 0 模电压和 0 模电流相量。

设电流从母线流向线路为正方向，SFB 频段内，故障线路故障点至母线段，0 模电流从线路流向母线，方向为负；健全线路及故障线路故障点至负荷段，0 模电流从母线或故障点流向负荷，方向为正。SFB 频段内，0 模网络所有线路均可等效为集中参数电容，有，故障线路故障点至母线段：

0 模导纳：

$$\dot{Y}_{0b}(j\omega) = -j\omega C_{0b} \quad (7-11a)$$



相角：

$$\arg \dot{Y}_{0b} = -\frac{\pi}{2} < 0 \quad (7-11b)$$

式中： C_{0b} 为故障点至母线段检测点检测到的线路等效电容。

故障线路故障点至负荷段：

0 模导纳：

$$\dot{Y}_{0l}(j\omega) = j\omega C_{0l} \quad (7-12a)$$

相角：

$$\arg \dot{Y}_{0l} = \frac{\pi}{2} > 0 \quad (7-12b)$$

式中： C_{0l} 为故障点至负荷段检测点检测到的线路等效电容。

健全线路：

0 模导纳：

$$\dot{Y}_{0n}(j\omega) = j\omega C_{0n} \quad (7-13a)$$

相角：

$$\arg \dot{Y}_{0n} = \frac{\pi}{2} > 0 \quad (7-13b)$$

式中： C_{0n} 为健全线路检测点检测到的线路等效电容。

SFB 频段内 0 模导纳相角的极性代表了 0 模电流的方向，理论上可以利用任一频率下的 0 模导纳计算故障方向，但是：

① 单一频率下的 0 模电压和 0 模电流信号能量较小。

② 由于干扰信号的影响，某些频率下的 0 模导纳及相角不满足上述关系。

③ 实际应用中，SFB 频段不易准确确定，在 SFB 之外，上述关系不成立。

图 7-2 所示为清濛变一次典型接地故障时，利用母线处的 0 模电压与线路出口处的 0 模电流计算单一频率下的 0 模导纳相角。从图 7-2 可以看出，在低频段，故障线路 0 模导纳相角为负，随着频率的增加，相角正负交替出现，很难确定一个精确的 SFB 频段。



本例中,可粗略确定 $150\sim 700\text{Hz}$ 为 SFB 频段。该频段内,由于干扰信号的影响,某些频率下导纳相角呈现相反的规律,即故障线路中某些频率下导纳相角为正,而健全线路某些频率下导纳相角为负。

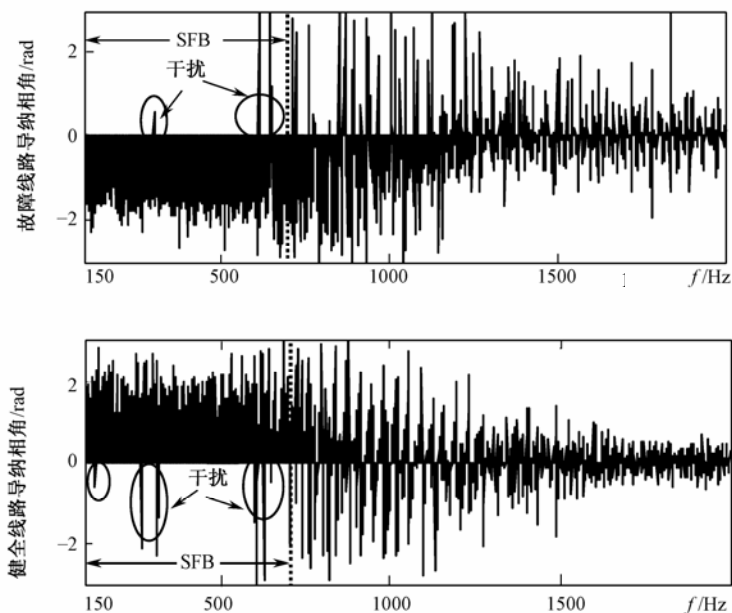


图 7-2 清濛变故障数据 0 模导纳相角分析

7.2.2 特征频段内 0 模复合导纳

SFB 频段包含了暂态信号的绝大部分能量, SFB 频段之外信号及干扰信号能量很小。在 SFB 频段内, 由于线路等效为电容, 在暂态持续时间内, 电容与电源之间只进行能量的交换, 不消耗能量, 可用无功功率作为能量交换的量度。无功功率绝大部分集中在 SFB 频段内, SFB 频段外信号无功功率很小, 图 7-2 所示的 0



模导纳相角规律不成立的干扰信号的无功功率也很小,图 7-2 所示信号的无功功率分布图如图 7-3 所示。

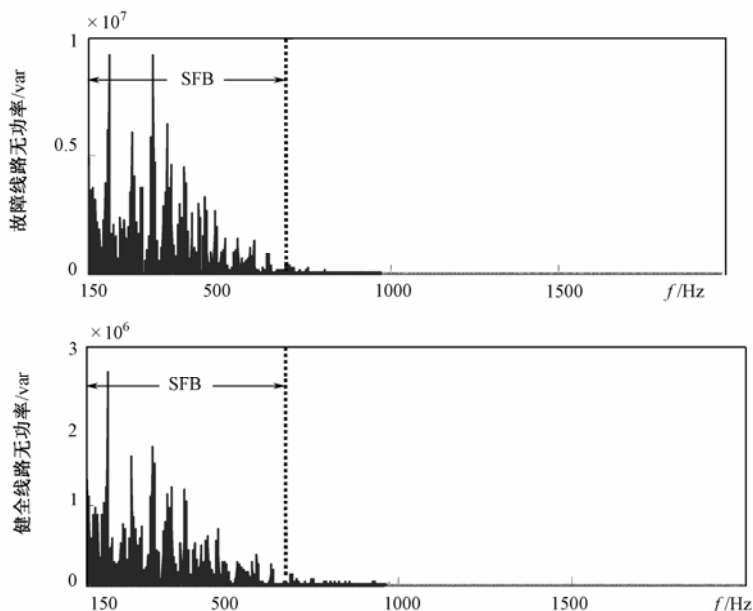


图 7-3 清濛变故障数据无功功率分布图

为充分利用整个 SFB 频段内信号,提高抗干扰能力,定义 SFB 频段内 0 模复合导纳为

$$\dot{Y}_t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_\omega|}{Q} \dot{Y}_0(j\omega) d\omega \quad (7-14)$$

式中: q_ω 为频率为 ω 的 0 模电压和 0 模电流信号产生的无功功率; Q 为 SFB 频段内同频率 0 模电压和 0 模电流产生的无功功率的代数和; ω_1 、 ω_2 为 SFB 频段上下限截止频率。

频率为 ω 的 0 模无功功率为

$$q_\omega = U_{0\omega} I_{0\omega} \sin \varphi \quad (7-15)$$



式中: $U_{0\omega}$ 、 $I_{0\omega}$ 为频率为 ω 的 0 模电压和 0 模电流的有效值; φ 为电压电流相位差。

SFB 频段内, 健全线路与故障线路故障点至负荷段有 $\sin \varphi = -1$, 故障线路故障点至母线段有 $\sin \varphi = 1$, 正负号代表功率方向。

SFB 频段内, 同频率 0 模电压与 0 模电流产生的无功功率的代数和 Q 表示为:

$$Q = \int_{\omega_1}^{\omega_2} |q_{\omega}| d\omega \quad (7-16)$$

7.2.3 0 模复合导纳应用于故障定位的可行性分析

将式 (7-11a) 代入式 (7-14), 故障线路故障点至母线段, 有

$$\dot{Y}_{tb} = -j \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega b}|}{Q_b} \omega C_{0b} d\omega = -j \rho_{0b} \quad (7-17a)$$

由于 $\rho_{0b} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega b}|}{Q_b} \omega C_{0b} d\omega > 0$, 有

$$\arg \dot{Y}_{tb} = -\frac{\pi}{2} < 0 \quad (7-17b)$$

将式 (7-12a) 代入 (7-14), 故障线路故障点至负荷段, 有

$$\dot{Y}_{tl} = j \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega l}|}{Q_l} \omega C_{0l} d\omega = j \rho_{0l} \quad (7-18a)$$

由于 $\rho_{0l} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega l}|}{Q_l} \omega C_{0l} d\omega > 0$, 有

$$\arg \dot{Y}_{tl} = \frac{\pi}{2} > 0 \quad (7-18b)$$

将式 (7-13a) 代入 (7-14), 健全线路, 有

$$\dot{Y}_{tn} = j \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{\omega n}|}{Q_n} \omega C_{0n} d\omega = j \rho_{0n} \quad (7-19a)$$



由于 $\rho_{0n} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{|q_{0n}|}{Q_n} \omega C_{0n} d\omega > 0$, 有

$$\arg \dot{Y}_m = \frac{\pi}{2} > 0 \quad (7-19b)$$

根据式 (7-17)、式 (7-18)、式 (7-19), 在 SFB 频段内, 0 模复合导纳相角的极性代表了 0 模电流的方向, 可用作保护用参量, 利用其来计算故障方向, 实现接地故障定位。

7.2.4 复合导纳法故障定位原理

在 SFB 频段内, 小电流接地故障 0 模网络故障点上游和下游线路入端阻抗成容性, 可用集中参数电容等效。各检测装置利用记录到的暂态 0 模电压和暂态 0 模电流计算暂态 0 模复合导纳, 并将复合导纳相角上报故障定位主站, 故障定位主站根据故障点上游暂态 0 模复合导纳相角接近 $\pi/2$ 、极性为负, 故障点下游暂态 0 模复合导纳接近 $-\pi/2$ 、极性为正的征特征确定故障区段。故障点位于最后一个极性为负的检测点和第一个极性为正的检测点之间。若所有检测点处复合导纳相角均为负, 则故障点位于最后一个检测点与线路末端区段。

7.2.5 0 模复合导纳法特点

(1) 可靠性更高

以 0 模电压作为装置的启动和校验条件, 且在故障检测方法中, 同时利用暂态 0 模电压和暂态 0 模电流信号, 大大增加了故障检测的可靠性。

(2) 不受线路参数 (等效电容) 变化的影响

SFB 频段内, 线路等效电容不是一个恒定不变的常量, 是随频率变化的, 如图 2-17 所示。等效电容的变化, 可能会造成故障



线路与健全线路 0 模电流的极性不完全相反, 影响故障方向的计算。本方法根据暂态 0 模复合导纳相角来计算故障方向, 等效电容的变化不影响复合导纳的相角, 不影响计算故障方向。

(3) 不受多频率信号混叠的影响

SFB 频段的范围较宽, 包含了大量不同频率的暂态信号。在单一频率下, 故障线路和健全线路 0 模电流极性完全相反。但是多个频率信号叠加后, 故障线路与健全线路的 0 模电流极性在某些时刻会出现不完全相反现象, 影响故障方向的计算。本方法先求取单一频率下的 0 模导纳, 然后再在 SFB 频段内进行积分, 消除了不同频率信号混叠产生的影响。

(4) 抗干扰能力强

利用无功功率对不同频率下的 0 模导纳进行加权, 大大降低了能量弱的干扰信号和 SFB 频段外信号的影响, 提高了抗干扰能力。

(5) 不受间歇性电弧的影响

复合导纳法是利用 0 模电压和 0 模电流计算故障方向, 故障点上游(或下游)的检测点利用每次拉弧过程的暂态信号计算的故障方向是相同的, 因此复合导纳法不受间歇性电弧的影响。

(6) 缺点

本方法需要同时检测线路 0 模电压和 0 模电流信号, 线路中需要加装零序(0 模)电压互感器或者其他的 0 模电压检测装置。

7.3 定位方法性能比较

不同的定位方法性能不同, 比较时要充分考虑可靠性、安全性、经济性、是否受消弧线圈影响、是否需要不同监测点时间精确同步、数据批量传输等因素。



(1) 可靠性

可靠性是评价一种定位方法和装置最重要的一个指标。无论什么定位方法和装置如果可靠性低，那么肯定不能算是好方法。由于现场条件的复杂性，定位可靠性受多种因素的影响，主要有：

1) 所用信息量的大小

一种检测方法的可靠性与其利用的信息量直接相关。利用的信息量越大，信噪比越大，检测可靠性就越高。方法所利用的信息，并不是简单地指装置从外部所获取的电压、电流等信号，而是从中提取的可直接支持该原理的部分分量。如谐波定位原理所利用的信息是指零序电压、电流中的谐波分量；利用前后不同时刻的状态进行比较（相对值）的方法，所利用的信息仅指不同时刻电压、电流等的变化量。

信息量的大小与所利用信号的幅值和持续时间成正比。即在相同的时间段内，所利用信号的幅值越大，可靠性越高。另一方面，利用信号的时间越长，如重复选线，也可以提高可靠性。

2) 弧光接地和间歇性接地

弧光接地与间歇性接地故障在实际运行中发生的概率较高。由于故障点不稳定，破坏了故障后的稳态量（包括工频、谐波、注入信号），影响定位可靠性。故障产生的接地电流本身可能随故障点的状态随时发生变化，使得利用前后两个不同时刻信号进行比较（相对值）的定位方法失去比较的基础。

3) 高阻接地故障

故障点存在过渡电阻时，无论是故障产生的稳态电流、暂态电流，还是其他设备产生的附加工频电流或注入电流，其幅值均会随之下降，降低了定位的可靠性。

(2) 安全性

定位方法和装置的安全性是至关重要的。安全性一方面体现



在定位装置自身安全，装置不为系统增加新的安全隐患。另一方面体现在装置不对其他设备和一次系统造成潜在的危害，装置不影响其他设备的正常运行，不改变系统的运行状态，对一次系统无任何不良影响，在发生接地故障时，不增加系统的接地电流等。主动式的故障定位方法需要加装一次设备，相比而言，被动式定位方法安全性更高。

（3）经济性

选用一种定位方法时，需要考虑其经济成本。采用不同原理的定位装置结构迥异，相应的装置成本也不同，特别是需要附加其他设备的装置成本可能要高很多。

各种定位方法性能比较详细情况请参阅表 7-1。

表7-1 定位原理性能比较

定位方法	可靠性	安全性	经济性	是否受 消弧线 圈影响	是否需要不 同监测点时 间精确同步	是否需要 批量传输 数据	是否需 要0模电 压
注入法	较高	低	低	否	否	否	否
中电阻法	较高	低	低	否	否	否	否
稳态零序电 流比较法	低	高	高	是	否	否	否
稳态无功功 率方向法	低	高	较高	是	否	否	是
五次谐波法	低	高	较高	否	否	否	是
暂态零序电 流比较法	高	高	低	否	是	是	否
复合导纳法	高	高	较高	否	否	否	是



7.4 本章小结

在 SFB 频段内，0 模网络中所有线路输入阻抗成容性，利用单一频率 0 模无功功率与整个频段内同频率 0 模电压与 0 模电流产生的无功功率代数值的比值作为该频率下 0 模导纳的加权系数，对整个频段内的单一频率 0 模导纳进行加权积分作为 0 模复合导纳。通过计算 0 模复合导纳的相角确定故障方向，实现接地保护。与其他方法相比，本方法可靠性更高，但是需要同时检测线路 0 模电流和 0 模电压信号，实现较复杂。

第 8 章 小电流接地故障定位方法的 仿真与试验验证

本章利用电磁暂态仿真软件 ATP 对不同故障条件下的小电流接地故障进行了仿真,验证了故障定位方法的正确性。搭建了试验平台及试验系统,对故障定位方法进行了试验验证。

8.1 仿 真 验 证

本书依然采用 EMTP-ATP 仿真软件,对小电流接地系统的单相接地故障进行了大量的仿真。利用 MATLAB 编写定位算法的程序,调用电磁暂态仿真程序仿真的各种单相接地故障数据,验证本书提出的故障定位方法。

系统的仿真模型如图 8-1 所示,模型参数如 3.1.3 (1) 中所述。线路长度分别为 3km、6km、14km、12km、15km、9km。图中 $Q_1 \sim Q_7$ 为线路 l_3 沿线的 7 个检测点,每个检测点之间的距离为 2km。故障发生在线路 l_3 ,距母线 7km 处。

不同电压初相角,不同接地电阻以及不同故障距离时的仿真结果如表 8-1 和表 8-2 所示。

从仿真结果看,发生小电流接地故障时,故障点上游至母线段的暂态 0 模复合导纳相角小于零,接近 $-\pi/2$,而故障点至负荷段的检测点的复合导纳相角大于零,接近 $\pi/2$ 。利用此特征可以确定故障区段,验证了复合导纳法的正确性。

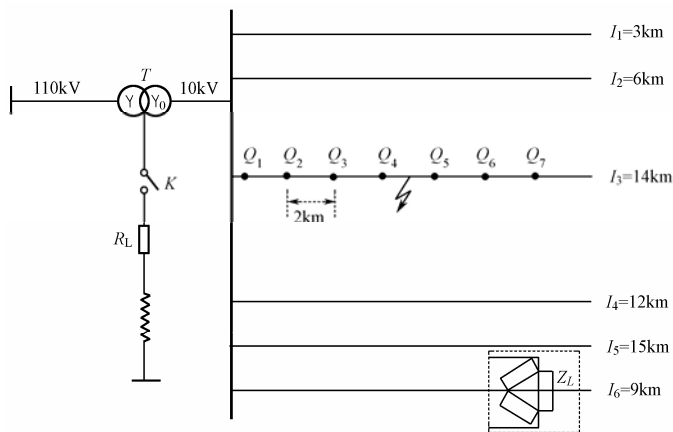


图 8-1 小电流接地故障仿真模型

表8-2 电压初相角为 90° ，不同故障距离，不同接地电阻时的复合导纳相角



8.2 试验验证

8.2.1 试验平台介绍

由于现场试验条件限制，作者在实验室进行了试验验证。用隔离变压器代替系统电源部分，模拟中性点不接地系统，系统为 3 条出线。用集中电容代替各线路对地分布电容，各条出线的对地电容分别为： $C_1 = 30\mu\text{F}$ ， $C_2 = 40\mu\text{F}$ ， $C_3 = C_{31} + C_{32} = 15\mu\text{F}$ 。变压器原边电压为 380V，副边电压为 115V。三相线路离地面高度 2m，三相导线“水平”排列，导线间距 30cm。

在接地点前后及健全线路各取 1 个检测点，在每个检测点的线路正下方离地面 0.8m 处安装电场传感器和磁场传感器用以感应垂直电场和水平磁场。试验平台示意图如图 8-2 所示。

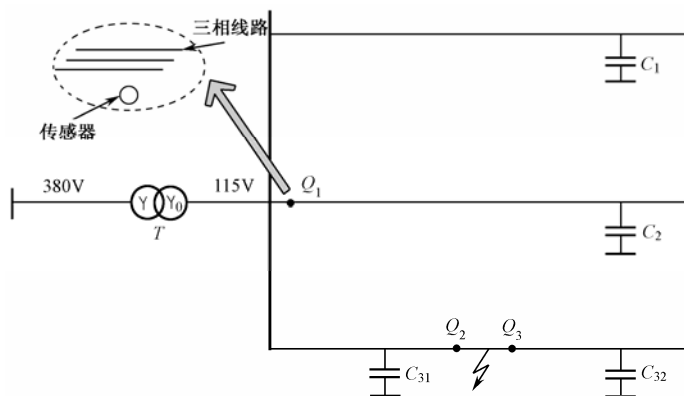


图 8-2 试验平台示意图

利用高速数据采集装置记录 3 个检测点的电磁场传感器的输出信号，每工频周期采集 128 个点。



8.2.2 试验验证

利用上述试验平台进行小电流接地试验，由于高速数据采集装置为电磁场瞬时值超过设定的门槛启动，由接地故障引起的装置启动 100 次，由于干扰引起的装置启动 6 次。通过工频电场增量（工频 0 模电压）进行校验均可将干扰引起的误启动排除。对装置记录的 100 次接地故障数据，利用复合导纳法进行验证，定位结果均正确。

一次接地试验中，利用高速数据采集装置采集到的电磁场传感器输出的故障波形如图 8-3 所示。

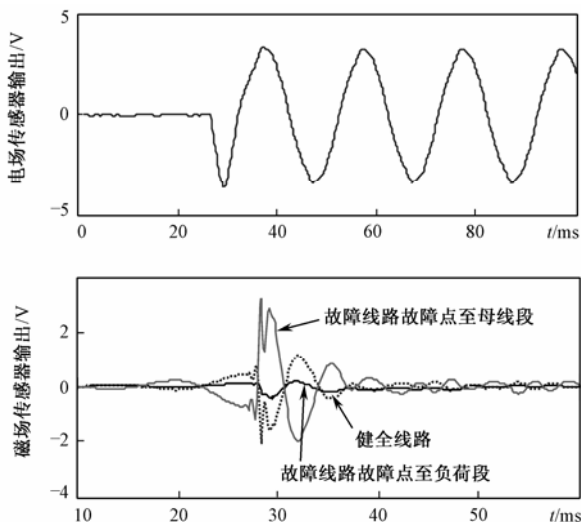


图 8-3 电磁场传感器输出的故障波形

从图 8-3 中可看出，发生小电流接地故障时，故障线路故障点至母线段检测点检测到的暂态水平磁场最大，且与故障线路故障点下游、健全线路暂态水平磁场极性相反。利用获得的故障信号



计算复合导纳。

故障线路故障点至母线段检测点复合导纳为：

$$\dot{Y}_{lb} = 0.1667 - j0.6827$$

相角为：

$$\arg \dot{Y}_{lb} = -76.2^\circ$$

故障线路故障点至负荷段检测点复合导纳为：

$$\dot{Y}_{ll} = -0.0219 + j0.0984$$

相角为：

$$\arg \dot{Y}_{ll} = 102.6^\circ$$

健全线路复合导纳为：

$$\dot{Y}_m = -0.0781 + j0.4065$$

相角为：

$$\arg \dot{Y}_m = 100.9^\circ$$

故障线路故障点至母线段线路的暂态 0 模复合导纳相角小于零，而健全线路和故障线路故障点至负荷段线路的暂态 0 模复合导纳大于零，利用此特征可以确定故障区段。

8.3 本章小结

利用仿真数据对基于 0 模复合导纳的故障定位方法进行了验证。结果表明，该方法可有效地实现故障定位。

利用搭建的小电流接地故障试验平台与高速数据采集装置验证了基于暂态 0 模复合导纳定位方法的正确性。

第 9 章 智能配电网故障定位 关键技术初探

本章介绍了智能配电网故障定位的背景和研究的意义，针对智能配电网的要求，建立了智能配电网模型和智能终端单元模型，基于智能配电网模型和智能终端单元模型，提出了适用于智能配电网的故障区段定位、网络重构、故障诊断和分布式控制方法。

9.1 智能电网概述

进入 21 世纪以来，随着社会和经济的发展和技术的进步及人类对电力信赖程度的加大，智能电网（SG，Smart Grid）的概念应运而生，并在近两年成为全球电力行业研究和探讨的热点。智能配电网（SDG，Smart Distribution Grid）是智能电网的重要组成部分，智能电网与传统电网的区别在配电网上的表现的更为明显。配电网直接面向用户，是控制、保障用户供电质量的关键环节；目前用户停电 95%是由配电网系统引起的；电网 50%的损耗发生在配电网中；分布式电源主要影响配电网的运行与控制；但是现有配电网的智能化和自动化水平程度远低于输电网，因此配电网智能化是建设智能电网的重要环节。由于智能配电网中存在大量的分布式电源，使传统的配电网故障检测、定位和网络重构方法失效，若使智能配电网推广应用，必须设计出适用于智能配电网的故障检测和分析方法。智能配电网较之传统配电网结构更复杂，馈线终端单元（FTU）和配电主站之间需要进行大量的数据传输，原有的配电网和 FTU 已无法满足实时性要求，需要由终端单元采



用分布式控制方法实现故障隔离和网络重构,急需研究适用于智能配电网的分布式控制方法。适用于智能配电网的故障检测和分析算法以及分布式控制算法在传统的 FTU 中已无法实现,需要设计一种新的适用于智能配电网的智能终端单元 (ITU),该 ITU 可以实现分布式控制,不但具有实时监测运行状态和故障状态功能,而且具有数据处理和计算功能,故障判定、处理功能,故障隔离、负荷转供、恢复和自愈功能,实现就地控制。因此,为了满足智能配电网的需要,研究适用于智能配电网的故障定位和分布式控制方法,不但充实了智能电网理论,具有重要的理论价值,而且对促进智能电网的实施具有重要的实用价值,进而对提高供电安全性、可靠性和经济性具有重要的意义。

欧美各国对智能电网的研究开展较早,且已经形成强大的研究群体。由于各国的具体情况不同,其智能电网的建设动因和关注点也存在差异。美国主要关注电力网络基础架构的升级更新,同时最大限度地利用信息技术,实现系统智能对人工的替代。主要实施项目有:美国能源部和电网智能化联盟主导的 GridWise 项目和 EPRI 发起的 Intelligrd 项目。欧洲则重点关注可再生能源和分布式能源的发展,并带动整个行业发展模式的转变。主要实施项目有:Dispower、CRISP 和 Microgrids。

虽然我国还没有从国家层面制定智能电网的发展战略,但在很多方面的研究成果已经为发展智能电网奠定了一定的基础。华东电网公司于 2007 年在国内率先开展了智能电网可行性研究,并设计了 2008—2030 年“三步走”的行动计划。2009 年 2 月 28 日,华北电网稳态、动态、暂态三位一体安全防御及全过程发电控制系统在京通过专家组验收。在输电网建设方面,2006 年年底交流特高压示范工程奠基,2008 年 8 月正式建成投运。在控制系统新技术方面,由中国电力科学研究院等单位承担的在研国家 973 计划项目,开展了基于智能和专家系统的电力系统故障诊断和恢复控制技术研究。国家电网公司推行了 SG186 一体化平台建设。在可再生能源发电方面,



国家也启动了多项 863 高技术研究发展计划项目。

因此，国内外研究学者对智能电网研究尚处在初级阶段，尚没有进行深入研究，而智能配电网的研究更没有深入、细致的研究，需要进行大量研究工作。

常规配电网的故障选相和断线故障检测技术已经比较成熟，可以直接应用到智能配电网中。常规电网的继电保护技术也已比较成熟，也可直接应用到智能配电网中，只不过在电网重构后需要对继电保护进行再整定。智能配电网故障定位对于相间短路故障由于故障电流比较大，进行故障定位较容易，原有的方法和理论可以直接应用于智能配电网。但是，对于单相接地故障，由于故障电流微弱和电弧不稳定等原因，故障定位较困难。现有的故障区段定位方法，主要有行波法、S 注入法和故障指示器法等。行波法的行波波头识别十分困难；注入法在高阻接地故障时，电流信号差别不大，无法判别故障方向。故障指示器法，由于其经济、有效而受到重视。但是，故障指示器法仅根据本地故障电压和电流信号进行故障区段定位，没有充分利用邻近节点的故障数据，对单相接地故障检测效果不好，且该方法不适用于含有分布式电源的智能配电网。这些方法均不适用于具有互动、自愈、坚强等特征且含有大量分布式电源的智能配电网。文献[246]对含有大量分布式电源的配电网相间短路故障进行了定位研究，未涉及单相接地故障定位研究，研究尚不深入。

故障恢复是将因故障而停电的负荷恢复供电，然后对继电保护再整定。故障恢复首先需要对切除故障区段的配电网进行重构，常用的方法有：遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、免疫算法和多 Agent 法等，根据重构方案对配电网恢复供电。由于配电网结构发生了变化，原有的继电保护需要重新整定。常规电网中不含有分布式电源，配电网重构算法和对分段开关和联络开关操作命令都是由控制中心实现的，不能满足快速性要求；智能电网中含有大量的分布式电源，重构算法和各种操作命令需要通过当地智能终端单元实现，并建立分布式



控制网络。文献[252]和[253]对智能配电网的网络重构和保护控制进行了研究,但尚处在研究的初级阶段,没有将智能配电网的保护、定位、重构、诊断和分布式控制融为一体。

配电网故障诊断是通过采集的电网信息,对电网的各个环节进行分析,判断故障设备(如断路器拒动、误动等),并预测配电网中的薄弱环节或可能发生故障的环节,根据预测结果,及时对相应环节采取防御措施,并将相应信息上报控制中心。常用的故障诊断方法有:神经网络法、贝叶斯法、模糊集理论法、粗糙集理论法和多 Agent 法等。但这些故障诊断算法都是由控制中心实现,而不是由智能终端单元实现,加重了控制中心的负担。文献[259]对基于广域测量系统的电网故障诊断进行了初探,较适合于智能配电网,若将其应用到智能配电网,需要与智能配电网的其他功能模块密切配合。

通过配电网故障定位确定了故障区域,需要对故障区域隔离;配电网隔离后,需要对非故障区域恢复供电,这些任务的实现在传统的配电网中大多是通过控制中心下达控制命令实现的。不但增加了控制中心的负担,而且影响了控制的实时性、可靠性,不适用于智能配电网。要满足智能配电网的要求,必须建立分布式控制网络,实现分布式控制,即通过网络中各智能终端单元的信息交互,由智能终端单元控制附近的开关,实现故障隔离和网络重构。

由于欲在智能配电网中实现继电保护、故障定位、故障诊断、网络重构和分布式控制,需要各智能终端单元之间、终端单元和控制中心之间进行信息交互和互操作,而信息传输的基础是通信网络,因此需要在智能配电网中建立通信网络。本项目拟建立一个符合 IEC61850 标准光纤以太网,目前已有许多学者对该通信协议进行了研究,但是这些研究局限于数字变电站,而不是针对智能配电网,若将其应用到智能配电网,仍需大量的研究工作。

综上所述,本项研究将借鉴常规配电网的故障定位、网络重构、故障诊断和控制方法,根据智能配电网的要求,建立一个通过基于光纤以太网的 IEC61850 标准将智能终端单元和控制主站互



联成一体的分布式控制网络，实现设备间信息的交互和互操作，智能终端单元根据本地采集的信息和其他节点的信息，实现对智能配电网的运行状态监测、故障定位、故障诊断、故障隔离和供电恢复等功能，以满足智能配电网所要求的供电安全性、可靠性和经济性，具有广阔的应用前景。

9.2 智能配电网模型

借鉴原有配电网结构并按照智能电网要求设计的智能配电网模型如图 9-1 所示。智能配电网模型主要由变电所、馈线、分布式电源（DG）、分段开关、联络开关、智能终端单元（ITU）、全球定位系统 GPS 和通信网络等组成。变电站实现高级配电运行（ADO），ADO 的技术组成和功能主要包括：高级配电自动化（ADA）；高级保护与控制；配电快速仿真与模拟（DFSM）；新型电力电子装置；DER 运行；AC/DC 微网运行；运行管理系统（带有高级传感器）。ADO 主要的功能是使系统可自愈。为了实现自愈，电网应具有灵活的可重构的配电网络拓扑和实时监视、分析系统目前状态的能力。后者既包括识别故障早期征兆的预测能力，也包括对已经发生的扰动作出响应的能力。而在系统中安放大量的监视传感器并把它们连接到一个安全的通信网上去，是作出快速预测和响应的关键。配电快速仿真与模拟（DFSM）是 ADO 的核心软件，其中包括风险评估、自愈控制与优化等高级软件系统，为智能配电网提供数学支持和预测能力，以期达到改善电网的稳定性、安全性、可靠性和运行效率的目的。配电快速仿真与模拟（DFSM）需要支持 4 个主要的自愈功能：网络重构；电压与无功控制；故障定位、隔离和恢复供电；当系统拓扑结构发生变化时继保再整定。DFSM 通过智能终端单元（ITU）来实现跨地理边界和组织边界的故障检测、故障定位和智能控制，从而实现系统的



自愈功能。智能终端单元（ITU）能收集和交换系统信息并对分段开关或联络开关的局部控制作出决策，同时根据整个系统要求协调这些决策。ADO 中的高级配电自动化（ADA）是智能电网实现自愈的基础，与传统配电自动化相比，ADA 是革命性的。因为 ADA 是用于电力交换系统的（由于分布式电源并网运行，而使配电网支路上的潮流可能是双向的），其中将使用电力电子、信息、分布式计算与仿真方面的新技术；同时，ADA 可为用户提供新的服务。

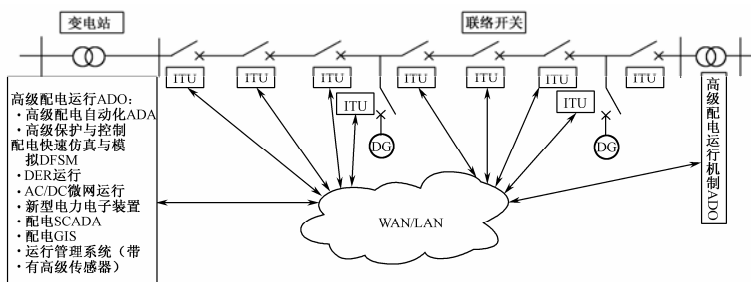


图 9-1 智能配电网模型

9.3 智能终端单元模型

智能终端单元 ITU 具有状态监测、故障检测、故障定位、故障诊断、传输信息、控制开关动作的作用，它通过检测线路是否失压、过流，以及失压、过流的次数和暂稳态电流、暂稳态电压来判断故障所在，继而操作开关，隔离故障，恢复供电。智能终端单元模型如图 9-2 所示。在电网正常运行时，ITU 的功能为：测量电压、电流、有功功率、无功功率、视在功率、功率因数、有功电能、无功电能和频率，并测量和评估系统的电能质量，其内容主要包括供电电压中的谐波、电压波动、电压闪变等参数；测量零序、负序电压及电流等反映系统不平衡程度的电气量；测量



和评估系统的电能质量，其内容主要包括供电电压中的谐波、电压波动、电压闪变等参数；测量一些设备的运行状态信息：测量断路器的位置信号，断路器失灵信号，各种越限动作跳闸信号，重合闸动作信号，交直流电源异常信号，小电流接地故障信号，负荷开关和分段开关位置信号，各类功能的闭锁信号和 ITU 故障信号；定时与控制中心和其他 ITU 交互信息等。在电网故障情况下，ITU 的功能包括检测电流信息或电压信息，判断并产生配电网故障信息，由此启动故障处理程序；测量电网电压、电流，启动故障处理；详细地记录故障电压和电流的波形，记录故障发生的时间及故障切除前后几个关键的故障电流、电压幅值以及故障方向；配合控制中心和其他 ITU 实现故障区段的精确定位；通过对故障信息的分析确定故障类型；配合其他 ITU，通过对分段开关的操作实现对故障区段的隔离；配合控制中心和其他 ITU，通过联络开关和分段开关的操作，实现配电网重构，恢复对未发生故障负载的供电；根据重构的电网结构实现继电保护的再整定；通过对电网信息的分析，预测电网可能发生的故障，提前进行防御；实时与控制中心和其他 ITU 交互信息；通过 GPS 实现与控制中心和其他 ITU 同步。同时，ITU 具有自检功能，一旦检测出本 ITU 出现问题，则立即将其退出网络，由邻近 ITU 接管其工作。

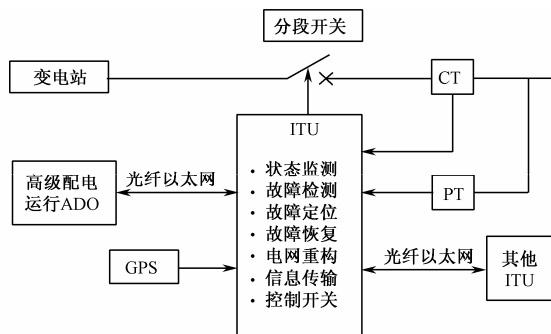


图 9-2 智能终端单元模型



9.4 基于Multi-Agent的智能配电网的故障定位技术

9.4.1 面向智能配电网的MAS结构

多代理系统(MAS, Multi-Agent System)理论认为 Agent 具有自治性(Autonomy)、社会性(Sociality)、反应性(Reactivity)和预动性(Pro-Activeness),感知环境变化,借助通信交换信息,由多个代理协调、协商与协作,达到问题的逐步求解,非常适合于要求信息交互和分布式控制的智能配电网。

将智能配电网中每个电气设备作为一个 Agent,研究面向智能配电网的 MAS 结构。其中, Agent 结构如图 9-3 所示。整个 Agent 的结构分为四层: I/O 层、计算层、决策层和通信层。I/O 层实现电压、电流和电气设备状态等数据的采集和开关动作、报警的控制;计算层实现电压电流有效值、有功、无功、谐波含量和零序电压电流等值的计算,各种故障特征的提取,进行保护计算以实现速断保护;决策层主要实现原始数据、中间数据和公共信息的存储,实现监控报警、后备保护、故障定位、供电恢复和故障诊断等决策,并协调 Agent 内各模块的工作;通信模块主要实现与其他 Agent 的通信和与用户交互。

9.4.2 适用于智能配电网的故障区段定位技术

各 Agent 检测本地节点的馈线信息,若检测到馈线的故障信号,向邻近 Agent 发送询问请求,并根据 ITU 获取的同步暂态电压和电流信号,利用小波包分析方法计算暂态电压、电流在特征频段内的无功功率,并和邻近 Agent 进行协商,通过对故障信息的共享,判断配电网是否出现故障,并确定故障区域。其中,同步



检测是通过各智能节点安装的 GPS 接收器接收的秒脉冲实现的。若判断出本节点处于故障区，则由 ITU 控制分段开关执行保护动作，切除故障；若本节点不处在故障区域，则发出恢复供电的请求。如果判断本地与故障区域相邻，则进入后备保护状态。由于配电网发生的故障种类多而且产生这些故障的原因也多种多样，因而基于 Agent 的 ITU 应具有区分不同类型故障并根据故障类型、灵活地作出有针对性的解决策略的能力。

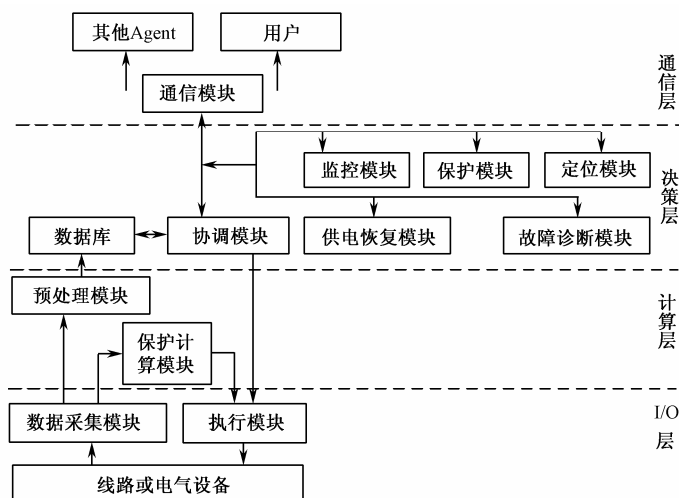


图 9-3 Agent 结构

9.4.3 适用于智能配电网的网络重构方法

配电网重构方案采用智能优化算法求解，以寻找最短的加权送电路径为优化目标，将网络重构建模为一个求图的局部最小树问题，并充分考虑各种网络约束条件。图的局部最小树问题已被证明是一个典型的 NPC 问题，难于快速确定最优解。因此，采用遗传算法（ACO）进行问题寻优。解算时，构建适当的基因链、



选取适当的适应度函数、恰当处理各种约束条件, 选择适当的选择、交叉、变异操作算子, 尽可能得到当前电网运行状况下的最优解。此外, 通过对算法性能的优化, 进一步提高了算法的求解稳定性和搜索效率, 从而能较好地平衡计算快速性和准确性的要求, 增强了寻优效果。各 Agent 将各自的重构方案通过协商得到最佳的重构方案。利用得到的重构方案, 由 ITU 控制相应的联络开关和分段开关实现故障恢复; 同时, 根据重构方案, 各 Agent 实现本节点继电保护的再整定。

9.4.4 适用于智能配电网的故障诊断方法

根据通过本地 Agent 和其他 Agent 采集的馈线和电力设备信息, 以及通过专家经验得到的相应决策, 建立决策表, 利用粗糙集理论属性约简和值约简能力得到最小决策规则, 即智能配电网故障诊断模型。利用该模型和检测的现场数据判断发生故障的设备, 并预测其薄弱环节或可能发生故障的环节。根据预测结果, 及时对相应环节采取防御措施, 并将相应信息上报控制中心。

9.4.5 智能配电网分布式控制方法

根据故障区段定位算法得到的故障区域, 设计分布式控制方法, 使各 ITU 相互配合, 通过分布式控制方式由较近的 ITU 控制相应开关, 实现故障区域隔离。同时, 完成故障隔离后, 根据网络重构算法得到的网络重构方案, 设计分布式控制方法, 使各 ITU 控制相应的开关, 实现非故障区域的供电恢复。若某个 ITU 出现故障, 则将其退出网络, 由邻近 ITU 接管其工作。

9.5 智能配电网的通信网络

智能配电网欲实现内部设备之间以及内部设备与主站之间进



行信息交互，必须设计一个通信网络。研究利用 IEC61850 标准通过光纤以太网建立智能配电网的通信网络。IEC61850 标准已成功应用于数字变电站内部，对其进行扩展，使其可以应用于智能配电网的智能终端单元之间、智能终端单元和控制中心之间的数据通信。

9.6 智能终端单元 ITU 的硬件和软件设计

智能终端单元 ITU 是实现智能配电网故障定位和分布式控制的基础，因此欲使所设计故障定位和分布式控制算法进行实验室和现场验证，需先设计智能终端单元。ITU 设计为基于 MCU+DSP+FPGA 的双 CPU 系统，MCU 为主 CPU，DSP 为辅助 CPU。图 9-4 为 ITU 的硬件结构图，系统按功能分为两大模块：数字信号处理单元和中央控制单元。数字信号处理单元的核心处理器采用 DSP（TMS320F2812），中央控制单元的核心处理器（MCU）采用 ARM9（EP9302），两个 CPU 之间通过一个 4KB 的双口 RAM 进行通信。数字信号处理单元主要完成故障检测、定位、重构和诊断等算法功能，中央控制单元采用嵌入式 LINUX 操作系统，主要完成控制开关输出、通信和维护等外围事务管理功能。系统设有高速工业 EtherNet 接口，作为 IEC61850 通信规约接口，实现与控制中心和其他 ITU 的通信功能。现场可编程门阵列 FPGA 主要实现高速数据采集、数据循环存储、故障检测以及各种逻辑控制。

ITU 的软件通过在嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 中建立多任务，实现数据采集、故障定位、故障隔离、故障恢复、故障诊断、数据通信和分布式控制等实时性操作。

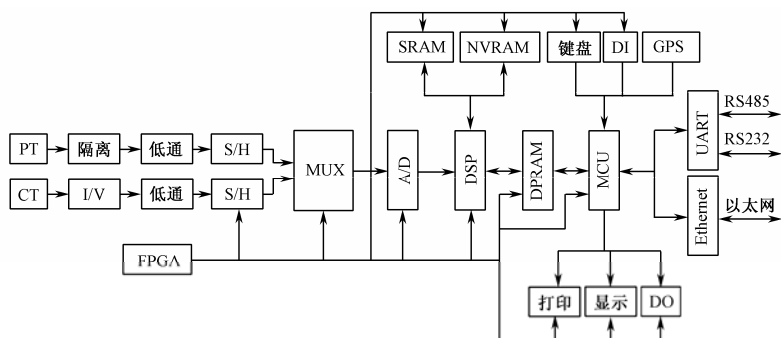


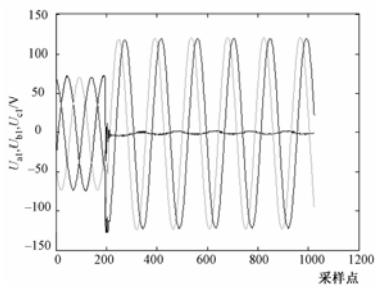
图 9-4 智能终端单元 ITU 的硬件结构图

9.7 本章小结

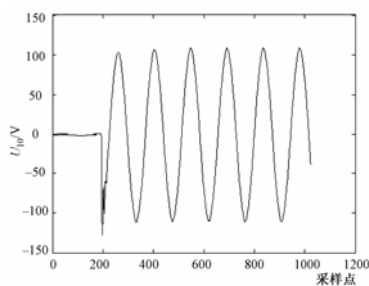
通过对智能配电网的功能和 Multi-Agent 的特点分析可知，利用 Multi-Agent 理论和智能终端单元通过基于光纤以太网的 IEC61850 标准可以现对智能配电网的运行状态监测、故障定位、故障诊断、故障隔离和供电恢复等功能，以满足智能配电网所要求的供电安全性、可靠性和经济性，具有广阔的应用前景。

附录 现场数据

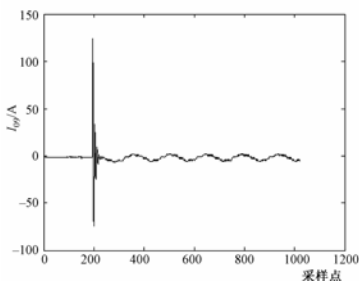
附录 1 竹园站 2004 年 4 月 16 日发生单相接地故障的部分数据



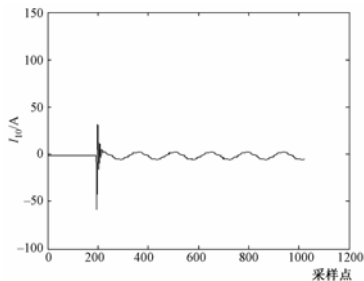
图附 1-1 三相电压波形



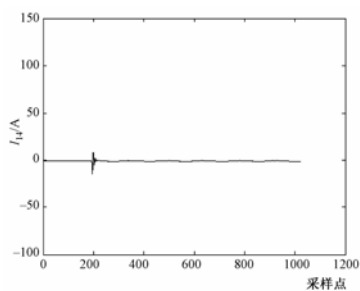
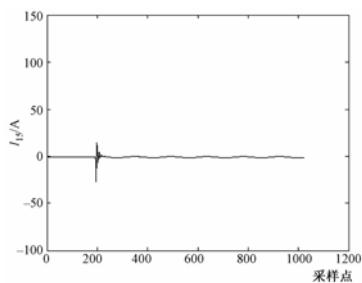
图附 1-2 零序电压波形



图附 1-3 线路 I_{09} 零序电流波形

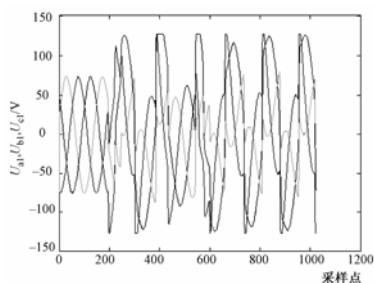


图附 1-4 线路 I_{10} 零序电流波形

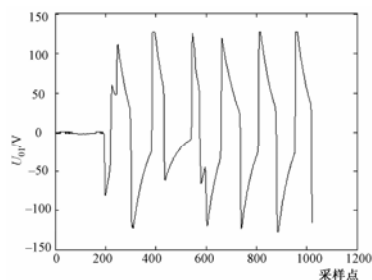
图附 1-5 线路 I_{14} 零序电流波形图附 1-6 线路 I_{15} 零序电流波形



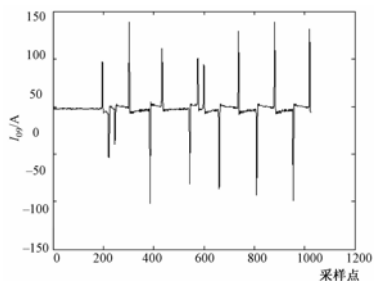
附录 2 竹园站 2004 年 12 月 18 日发生 单相接地故障的部分数据



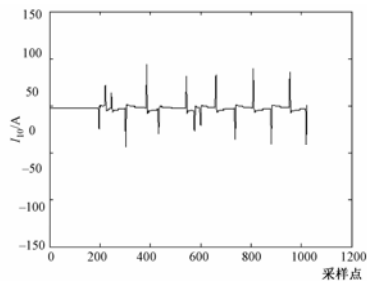
图附 2-1 三相电压波形



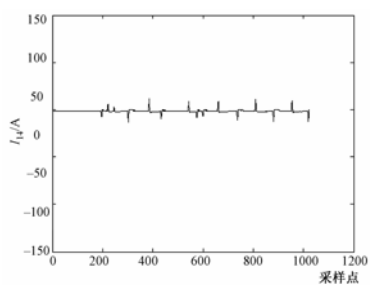
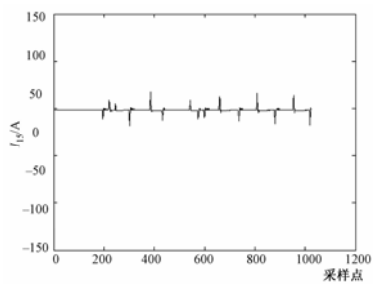
图附 2-2 零序电压波形



图附 2-3 线路 I_{09} 零序电流波形

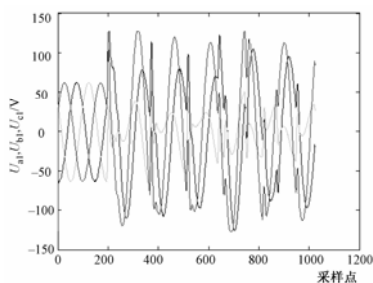


图附 2-4 线路 I_{10} 零序电流波形

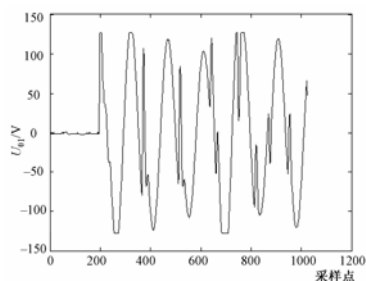
图附 2-5 线路 I_{14} 零序电流波形图附 2-6 线路 I_{15} 零序电流波形



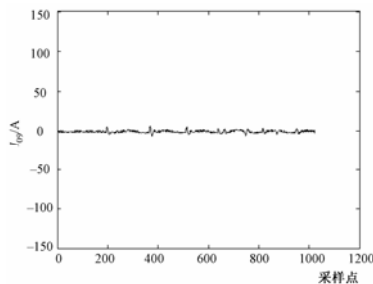
附录 3 清濛变 2005 年 5 月 18 日发生 单相接地故障的部分数据



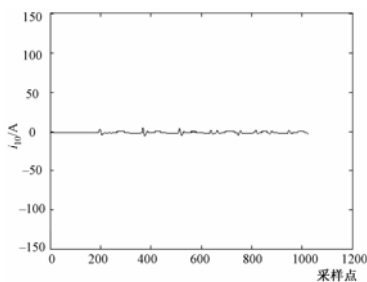
图附 3-1 三相电压波形



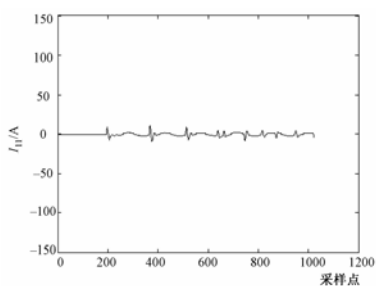
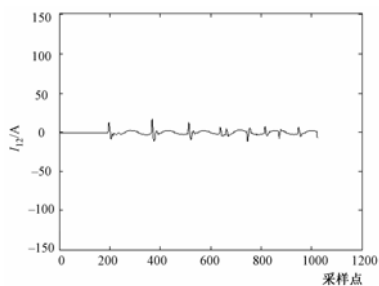
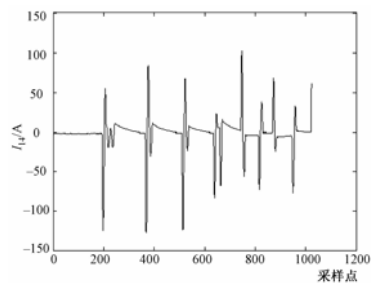
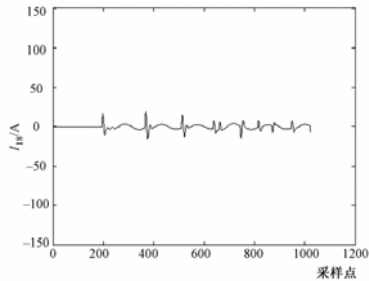
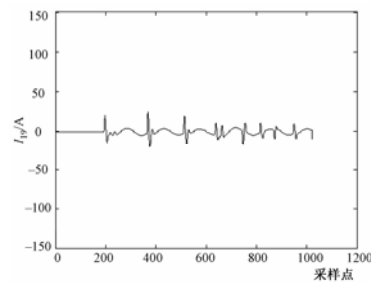
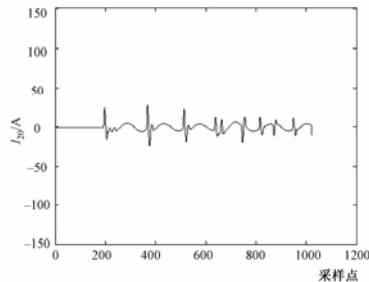
图附 3-2 零序电压波形



图附 3-3 线路 I_{09} 零序电流波形

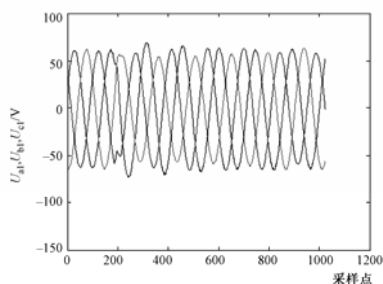


图附 3-4 线路 I_{10} 零序电流波形

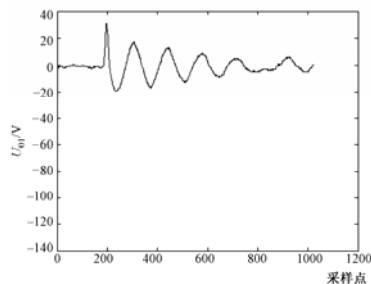
图附 3-5 线路 I_{11} 零序电流波形图附 3-6 线路 I_{12} 零序电流波形图附 3-7 线路 I_{14} 零序电流波形图附 3-8 线路 I_{18} 零序电流波形图附 3-9 线路 I_{19} 零序电流波形图附 3-10 线路 I_{20} 零序电流波形



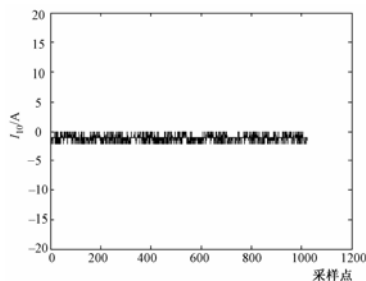
附录 4 清濛变 2005 年 9 月 30 日发生 单相接地故障的部分数据



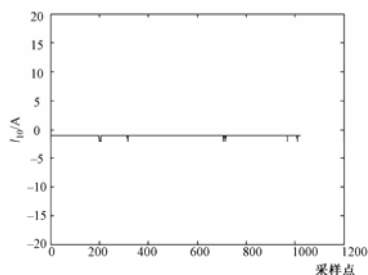
图附 4-1 三相电压波形



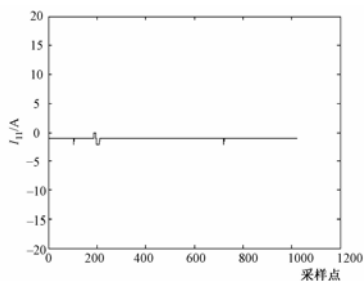
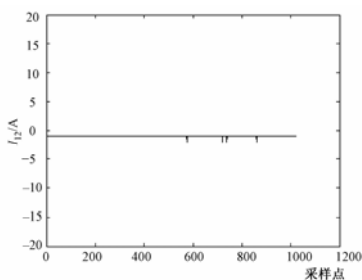
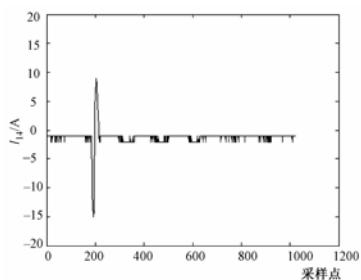
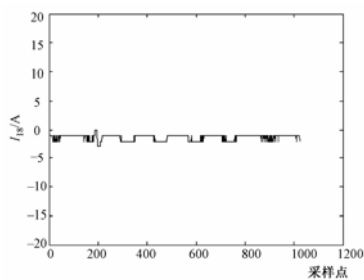
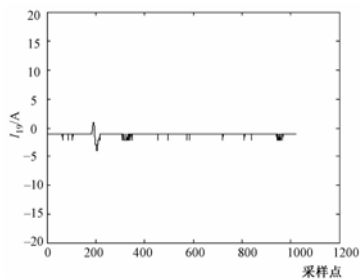
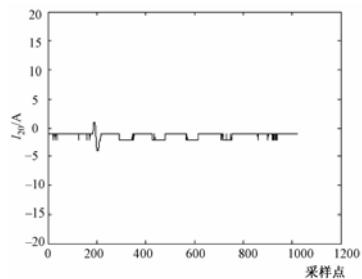
图附 4-2 零序电压波形



图附 4-3 线路 I_{09} 零序电流波形

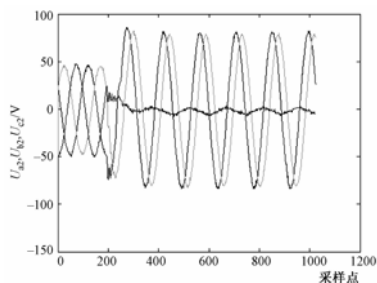


图附 4-4 线路 I_{10} 零序电流波形

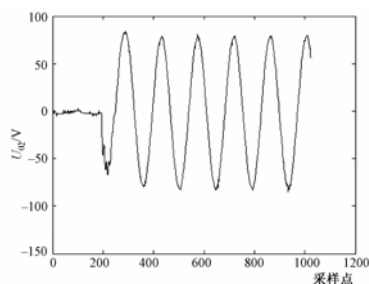
图附 4-5 线路 I_{11} 零序电流波形图附 4-6 线路 I_{12} 零序电流波形图附 4-7 线路 I_{14} 零序电流波形图附 4-8 线路 I_{18} 零序电流波形图附 4-9 线路 I_{19} 零序电流波形图附 4-10 线路 I_{20} 零序电流波形



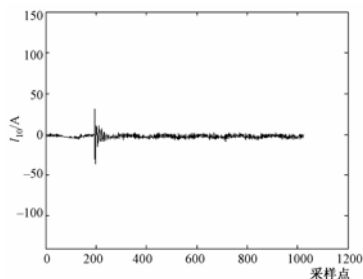
附录 5 潮湖变 2005 年 9 月 30 日发生 单相接地故障的部分数据



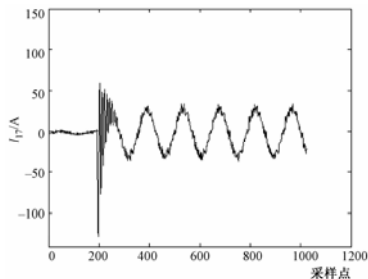
图附 5-1 三相电压波形



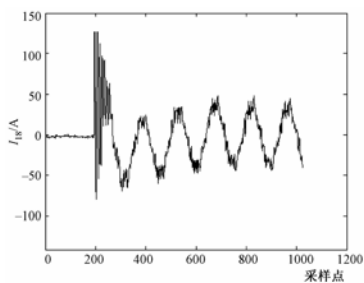
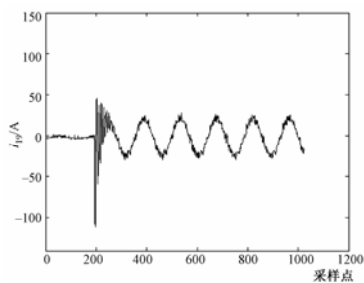
图附 5-2 零序电压波形



图附 5-3 线路 I_{10} 零序电流波形



图附 5-4 线路 I_{17} 零序电流波形

图附 5-5 线路 I_{18} 零序电流波形图附 5-6 线路 I_{19} 零序电流波形

参 考 文 献

- [1] 李润先. 中压电网系统接地使用技术. 中国电力出版社, 2002.
- [2] 要唤年, 曹梅月. 电力系统谐振接地. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] K M Winter. Swedish distribution networks-a new method for earth fault protection in cable and overhead systems. Proceedings of the Fifth International Conference on Developments in Power System Protection, 1993, (386): 268—270.
- [4] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理. 水利电力出版社, 1985.
- [5] 薛永端. 基于暂态特征信息的配电网单相接地故障检测研究. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [6] 齐郑. 小电流接地系统单相接地故障选线及定位技术的研究. 北京: 华北电力大学, 2005.
- [7] 贾清泉. 提高配电网单相接地故障选线保护性能的研究. 北京: 华北电力大学, 2002.
- [8] 许颖. 3~66kV 电网中性点接地方式的几个问题. 供用电, 2005, 22(6): 4—7.
- [9] Matti L, Tapio H. Neutral earthing and power system protection ABB Transmit Oy Publication, Vaasa, Finland 1996.
- [10] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法. 继电器, 2001, 29(4): 16—20.
- [11] 潘贞存. 比相式和比幅式小接地电流系统接地选线保护. 山东电力技术, 1991, (3): 60—64.
- [12] 郝玉山, 杨以涵, 任元恒, 等. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理. 电力情报, 1994, (2): 15—19.



- [13] 张尔桦, 潘贞存, 桑在中, 等. 群体比幅原理接地选线保护. 继电器, 1991, (2): 15—17.
- [14] 郝玉山, 高曙. MLN 系列小电流接地微机选线装置动作原理. 电力情报, 1994, (2): 7—10.
- [15] 檀国彪, 涂东明, 陈大鹏. 基于最大 $I\sin\varphi$ 或 $\Delta(I\sin\varphi)$ 原理的微机选线原理. 中国电力, 1995, 28(7): 16—20.
- [16] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理. 电网技术, 1999, 23(9): 60—62.
- [17] 杜丁香, 徐玉琴. 消弧线圈接地电网有功选线. 继电器, 2002, 30(5): 33—36.
- [18] 潘贞存, 田质广, 等. 一种中低压配电网单相接地故障选线新方法. 电网技术, 2005, 29(3): 76—80.
- [19] D. Griffel, V. Leitoff, Y. Harmand, et al. A new deal for safety and quality on MV networks. IEEE Transactions on Power Delivery. 1997, 12(4): 1428—1433.
- [20] Till Welfonder, Volker Leitloff, Rene Feuillet, et al. Location strategies and evaluation of detection algorithms for earth faults in compensated MV distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4): 1121—1128.
- [21] 郝玉山, 齐丽芳, 尹永生, 等. 零序网络中的谐波电流分布. 华北电力学院学报, 1995, 22(3): 12—17.
- [22] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1—5.
- [23] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈线接地保护的研究. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 5—10.
- [24] 易东, 李群湛, 黄彦全. 零序导纳法接地选线保护原理. 电力自动化设备, 2002, 22(10): 40—42.
- [25] B M Aucion, R H Jones. High impedances fault detection implementation issues. IEEE Transactions on Power Delivery,



- 1996, 11(1): 212—217.
- [26] 齐郑, 刘宝柱, 王璐, 等. 广域残留增量选线方法在辐射状谐振接地系统中的应用. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 84—88.
- [27] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 84—89.
- [28] 胡佐, 李欣然, 石吉银. 基于残流与首半波综合的接地选线方法研究. 继电器, 2006, 34(7): 6—9, 37.
- [29] 张兰, 龚静, 周有庆. 小电流接地系统单相接地暂态保护判据研究. 湖南大学学报, 2004, 31(2): 70—73.
- [30] Oinisi Chaari, Patrick Bastard, Michel Meunier. Prony's method: an efficient tool for the analysis of earth fault currents in Petersen-coil-protected networks. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1234—1241.
- [31] Oinisi Chaari, Michel Meunier, Francoise Brouaye. Wavelets: A new tool for the resonant grounded power distribution system relaying. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301—1308.
- [32] 操丰梅, 苏沛浦. 小波变换在配电网自动化接地故障检测中的应用研究. 电力系统自动化, 1999, 23(13): 33—36.
- [33] 毛鹏, 孙雅明, 张兆宁. 小波包在配电网单相接地故障选线中的应用. 电网技术, 2000, 24(6): 10—17.
- [34] 贾清泉, 刘连光, 杨以涵, 等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78—82.
- [35] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 54—58.
- [36] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44—47.
- [37] 齐郑, 陈炯聪, 杨奇逊. 基于小波变换和 LMS 自适应滤波器



- 的单相接地选线方法. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 58—61.
- [38] 齐郑, 杨以涵, 林榕. 基于小波变换和维纳滤波技术的小电流接地系统单相接地故障选线研究. 电网技术, 2004, 28(13): 23—26.
- [39] 戴剑锋, 张艳霞, 侯喆. 小波重构算法在配电网接地选线中的应用. 电网技术, 2004, 28(3): 43—47.
- [40] M Michalik, W Rebizant, M Lukowicz, et al. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet—based algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1793—1802.
- [41] A R Sedighi, M R Haghifam, O P Malik, et al. High impedance fault detection based on wavelet transform and statistical pattern recognition. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2414—2421.
- [42] T M Lai, L A Snider, E Lo, et al. High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 397—407.
- [43] Shyh-Jier Huang, Cheng-Tao Hsieh. High-impedance fault detection utilizing a Morlet wavelet transform approach. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1401—1410.
- [44] A. Lazkano, J Ruiz, E Aramendi, et al. A new approach to high impedance fault detection using wavelet packet analysis. Proceedings of Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, 3: 1005—1010.
- [45] 何奔腾, 胡为进. 能量法小电流接地选线原理. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(4): 451—456.
- [46] 束洪春, 刘娟, 王超, 等. 谐振接地电网故障暂态能量自适应选线新方法. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 72—76.



- [47] 贾清泉, 杨奇逊, 杨以涵. 基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判据融合. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 6—11.
- [48] 贾清泉, 杨以涵, 杨奇逊. 应用证据理论实现配电网单相接地故障选线保护. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 35—38, 44.
- [49] A. M. Sharaf, L. A. Snider, K. Debnath. A neural network based relaying scheme for distribution system high impedance fault detection. Proceedings of First New Zealand International Two-Stream Conference on Artificial Neural Networks and Expert Systems, 1993, 321—324.
- [50] T. M. Lai, L. A. Snider, E. Lo, et al. High impedance faults detection using artificial neural network. Sixth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 2003, 2: 821—826.
- [51] L A Snider, Yuen Yee Shan. The artificial neural networks based relay algorithm for distribution system high impedance fault detection. Fourth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 1997, 1: 100—106.
- [52] A M Sharaf, L A Snider, K Debnath. A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection. 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 1993, 2: 613—620.
- [53] 李荣明, 王官洁, 罗建. 基于神经网络的小电流接地系统综合智能选线. 重庆大学学报, 2004, 27(5): 85—89.
- [54] F Ruz, J A Fuentes. Fuzzy decision making applied to high impedance fault detection in compensated neutral grounded MV distribution systems. Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, 2001: 307—310.



- [55] 陈炯聪, 齐郑, 杨奇逊. 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 88—91.
- [56] M. R. Haghifam, A. R. Sedighi, O. P. Malik. Development of a fuzzy inference system based on genetic algorithm for high—impedance fault detection. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(3): 359—367.
- [57] 齐郑, 艾欣, 王炳革, 等. 基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线方法的有效域. 电网技术, 2005, 29(12): 43—46.
- [58] 桑在中, 张慧芬, 潘贞存, 等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 11—12.
- [59] 王新超, 桑在中. 基于“S注入法”的一种故障定位新方法. 继电器, 2001, 29(7): 9—12.
- [60] 曾祥君, 尹项根, 于永源, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 29—32.
- [61] 莫娟, 严璋, 李华, 等. 基于多种智能化方法的变压器故障综合诊断模型. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 85—89.
- [62] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 电力变压器故障诊断专家系统知识库建立和维护的粗糙集方法. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 31—35.
- [63] 朱永利, 吴立增, 李雪玉. 贝叶斯分类器与粗糙集相结合的变压器综合故障诊断. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 159—165.
- [64] 王永强, 律方成, 李和明. 基于粗糙集理论和贝叶斯网络的电力变压器故障诊断方法. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 137—141.
- [65] 王志勇, 郭创新, 曹一家. 改进范例推理在短期负荷预测中的应用. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 33—37.
- [66] 张晓星, 周淦, 任海军, 等. 基于增量约简算法确定电力负荷预测模型输入参数. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 40—44.



- [67] 黎静华, 栗然, 顾雪平, 等. 网络化的电力系统短期负荷预测的 MDRBR 模型. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 27—31.
- [68] J T Peng, C F Chien, T L B Tseng. Rough set theory for data mining for fault diagnosis on distribution feeder. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151: 689—697.
- [69] Peng Yuqing, Liu Gengqian, Lin Tao, et al. Application of rough set theory in network fault diagnosis. Third International Conference on Information Technology and Applications, 2005, 2: 556—559.
- [70] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 73—82.
- [71] 于之虹, 郭志忠. 基于数据挖掘理论的电力系统暂稳态稳定评估. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 45—48.
- [72] 廖志伟, 孙雅明. 基于数据挖掘模型的高压输电线系统故障诊断. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 15—19.
- [73] V Miranda, A R G Castro. Improving the IEC table for transformer failure diagnosis with knowledge extraction from neural networks. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2509—2516.
- [74] A R G Castro, V Miranda. Knowledge discovery in neural networks with application to transformer failure diagnosis. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 717—724.
- [75] P L Mao, R K Aggarwal. A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 654—660.
- [76] T Saksornchai, Lee Wei-Jen, K Methaprayoon, et al. Improve the unit commitment scheduling by using the neural- network-based



- short-term load forecasting. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(1): 169—179.
- [77] L Mohan Saini, M Kumar Soni. Artificial neural network-based peak load forecasting using conjugate gradient methods. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 907—912.
- [78] J W Taylor, R Buizza. Neural network load forecasting with weather ensemble predictions. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 626—632.
- [79] 杨光亮, 乐全明, 郁惟镛, 等. 基于小波神经网络和故障录波数据的电网故障类型识别. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 99—103.
- [80] 陈如清. 两种基于神经网络的故障诊断方法. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 112—115.
- [81] G Jr Cardoso, J G Rolim, H H Zurn. Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1034—1041.
- [82] Hsiung Cheng Lin. Intelligent Neural Network-Based Fast Power System Harmonic Detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 43—52.
- [83] D Srinivasan, W S Ng, A C Liew. Neural-Network-Based Signature Recognition for Harmonic Source Identification. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 398—405.
- [84] A G Bahbah, A A Girgis. New method for generators' angles and angular velocities prediction for transient stability assessment of multimachine power systems using recurrent artificial neural network. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1015—1022.
- [85] Shin Myong-Chul, Park Chul-Won, Kim Jong-Hyung. Fuzzy



- logic-based relaying for large power transformer protection. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 718—724.
- [86] Yang Hong-Tzer, Liao Chiung-Chou. Adaptive fuzzy diagnosis system for dissolved gas analysis of power transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1342—4350.
- [87] Huang Yann-Chang, Yang Hong-Tzer, Huang Ching-Lien. Developing a new transformer fault diagnosis system through evolutionary fuzzy logic. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 761—767.
- [88] 叶彬, 朱承治, 郭创新, 等. 基于混合算法的短期负荷预测模糊建模. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 32—40, 95.
- [89] Song Kyung-Bin, Baek Young-Silk, Hong Dug Hun, et al. Short-term load forecasting for the holidays using fuzzy linear regression method. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 96—101.
- [90] P A Matorocostas, J B Theocharis, A G Bakirtzis. Fuzzy modeling for short term load forecasting using the orthogonal least squares method. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 29—36.
- [91] S E Papadakis, J B Theocharis, S J Kiartzis, et al. A novel approach to short-term load forecasting using fuzzy neural networks. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 480—492.
- [92] B Das. Fuzzy Logic-Based Fault-Type Identification in Unbalanced Radial Power Distribution System. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 278—285.
- [93] S Vasilic, M Kezunovic. Fuzzy ART neural network algorithm for classifying the power system faults. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1306—1314.



- [94] 鲁文, 徐晨亮, 丁孝华, 等. 一种考虑分布电容的模糊故障测距算法. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 57—60.
- [95] 王伟, 张粒子, 麻秀范. 基于模糊综合评价的结构元中压配电网规划. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 42—46.
- [96] 谢敏, 陈金富, 段献忠, 等. 基于模糊阻塞管理的启发式电网规划方法. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 61—67.
- [97] 成敬周, 张举, 陈琛, 等. 基于高频暂态分量进行相关分析及模糊推理的选相新方法. 2005, 29(5): 50—55.
- [98] 陈章潮, 顾洁, 孙纯军. 改进的混合模拟退火—遗传算法应用于电网规划. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 28—31, 40.
- [99] I. J. Ramirez-Rosado, J. L. Bernal-Agustin. Genetic algorithms applied to the design of large power distribution systems. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 696—703.
- [100] 王秀丽, 李淑慧, 陈皓勇, 等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 11—15.
- [101] 杨秀霞, 张晓峰, 张毅, 等. 基于启发式遗传算法的舰船电力系统网络重构研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 42—46.
- [102] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新, 等. 配电网网络重构的改进遗传算法. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57—61.
- [103] 魏萍, 李乃湖, 武寒, 等. 基于遗传算法的电力系统日有功优化调度. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 23—27.
- [104] Y Malachi, S Singer. A genetic algorithm for the corrective control of voltage and reactive power. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 295—300.
- [105] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间电位的高级遗传算法. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127—130.
- [106] Su Hongsheng, Li Qunzhan. Transformer Insulation Fault Diagnosis Method Based on Rough Set and Fuzzy Set and



- Evidence Theory. The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, 2: 5442—5446.
- [107] 孙雅明, 廖志伟. 基于不同 RS 和 NN 组合的数据挖掘配电网故障诊断模型. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 31—35.
- [108] Li Qiu-Dan, Chi Zhong-Xian, Shi Wen-Bing. Application of rough set theory and artificial neural network for load forecasting. International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2002: 1148—1152.
- [109] Liao Gwo-Ching, Tsao Ta-Peng. Application of a fuzzy neural network combined with a chaos genetic algorithm and simulated annealing to short-term load forecasting. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 330—340.
- [110] Kim Kwang-Ho, Youn Hyoun-Sun, Kang Yong-Cheol. Short-term load forecasting for special days in anomalous load conditions using neural networks and fuzzy inference method. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 559—565.
- [111] A Khotanzad, Zhou Enwang, H Elragal. A neuro-fuzzy approach to short-term load forecasting in a price-sensitive environment. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1273—1282.
- [112] M Daneshdoost, M Lotfalian G Bumroongit, et al. Neural network with fuzzy set-based classification for short-term load forecasting. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1386—1391.
- [113] 毕天姝, 倪以信, 吴复立, 等. 基于径向基函数神经网络和模糊控制系统的电网故障诊断新方法. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 12—18.
- [114] 孙雅明, 杜红卫, 廖志伟. 基于神经逻辑网络冗余纠错和 FNN 组合的配网高容错性故障定位. 电工技术学报, 2001, 16(4): 71—75, 60.



- [115] 林飞, 刘玉田. 基于模糊神经网络的电力系统暂态稳定控制决策. 电工技术学报, 2001, 16(2): 83—87.
- [116] 冯丽, 邱家驹. 基于模糊多目标遗传优化算法的节假日电力负荷预测. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 29—34.
- [117] 申东滨, 潘贞存, 张慧芬, 等. 配电网单相接地故障的综合选线方法及其实现. 继电器, 2005, 33(18): 11—14.
- [118] 仇志华, 康忠健, 张加胜. 一种扩展隶属函数及其在故障诊断中的应用. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 50—54.
- [119] Yasmine ASSEF, Patrick BASTARD, Michel MEUNIER. Artificial neural networks for single phase fault detection in resonant grounded power distribution systems. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 1996: 566—572.
- [120] 房鑫炎, 郁惟镛, 庄伟. 模糊神经网络在小电流接地系统选线中的应用. 电网技术, 2002, 26(5): 15—19.
- [121] 都洪基, 姚婷婷, 刘林兴. 遗传优化神经网络在小电流接地系统故障选线中的应用. 继电器, 2004, 32(5): 29—31.
- [122] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [123] 解光润. 电力系统过电压. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [124] 牛发亮, 黄进, 杨家强. 基于电磁转矩小波变换的感应电机转子断条故障诊断. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 122—127.
- [125] 张大波, 刘志刚, 张亚军. 复小波研究现状及其在电力系统中的应用进展. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 97—104.
- [126] I Daubechies. Where do wavelet come from: a personal point of view. Proceeding of IEEE, 1996, 84(4): 510—513.
- [127] I Daubechies. Ten lectures on wavelets. Philadelphia, PA, USA: SIAM, 1992.
- [128] 王大凯. 小波分析及其在信号处理中的应用. 北京: 电子工业



- 出版社, 2006.
- [129] 任震, 黄雯莹, 黄群古, 等. 小波分析及其在电力系统中的应用. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [130] I Daubechies. Orthonormal bases of compactly supported wavelets II. Variations on a theme. SIAM J.Math.Anal., 1993, 24: 499—519.
- [131] A Cohen, I Daubechies. Orthonormal bases of compactly supported wavelets III. Better frequency localization. SIAM J. Math. Anal., 1993, 24: 520—527.
- [132] 庞清乐, 孙同景, 钟麦英, 等. 基于粗集理论的小电流接地系统故障选线. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 60—64.
- [133] 庞清乐, 孙同景, 穆健, 等. 基于神经网络的中性点经消弧线圈接地系统故障选线方法. 电网技术, 2005, 29(24): 78—81.
- [134] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 195—199.
- [135] 韩祯祥, 张琦, 文福拴. 粗糙集理论及其应用. 信息与控制, 1998, 27(1): 37—45.
- [136] Z Pawlak. Rough sets. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11: 341—356.
- [137] Z Pawlak. Why rough sets. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1996, 2: 738—743.
- [138] Z Pawlak. Rough sets approach to knowledge-based decision support. European Journal of Operational Research, 1997, 99: 48—57.
- [139] 曾黄麟. 粗集理论及其应用. 重庆: 重庆大学出版社, 1996
- [140] 刘清. Rough 集及 Rough 推理. 北京: 科学出版社, 2001.
- [141] 张文修, 仇国芳. 基于粗糙集的不确定决策. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [142] 曾祥君. 电力线路故障检测与定位新原理及其信息融合实现



- 研究. 武汉: 华中理工大学, 2000.
- [143] 康耀红. 数据融合理论与应用. 西安电子科技大学出版社, 1997.
- [144] S Grossberg. Neural Networks and Natural Intelligence. Cambridge, MA: MIT Press, 1988.
- [145] D E Rumelhart, J L McClelland. Parallel Distributed Processing: Explorations in Microstructure of Cognition. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- [146] D E Rumelhart, J L McClelland. Parallel Distributed Processing: Explorations in Microstructure of Cognition. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- [147] 刘同明, 夏祖勋, 等. 数据融合技术及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1998, 9.
- [148] Richard T Antony. Principle of Data Fusion Automation. London: Artech House, 1995.
- [149] Pramod K Varshney. Distributed detection and data fusion. New York: Springer, 1997.
- [150] 张雨, 温熙森. 设备故障信息融合问题的思考. 长沙交通学院学报, 1999, 15(2): 22—29.
- [151] 郁文贤, 雍少为. 多传感器信息融合技术评述. 国防科技大学学报, 1994, 16(3): 1—11.
- [152] 梁建成. 基于多传感器融合技术的智能加工监测与控制方法的研究. 武汉: 华中理工大学, 1995.
- [153] 伍行健. 故障信息的识别与处理. 武汉: 华中理工大学, 1999.
- [154] 张彦铎, 姜兴渭. 多传感器信息融合及在智能故障诊断中的应用. 传感器技术, 1999, 18(2): 18—22.
- [155] 高德平, 黄雪梅. 多传感器和数据融合. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 1—4.
- [156] 王耀南, 李树涛. 多传感器信息融合及其应用综述. 控制与决



- 策, 2001, 16(5): 519—522.
- [157] A Pinky, M Eskin, Y Soroka. Statistical cluster analysis approach to sensor fusion problem. Proceedings of the IEEE 1997 National Aerospace and Electronics Conference, 1997, 2: 809—814.
- [158] 曾祥君, K K Li, W L Chan, 等. 信息融合技术在故障选线中的应用. 继电器, 2002, 30(9): 15—20.
- [159] 庞清乐, 曹银杰, 穆健, 等. 基于粗集理论的小电流接地系统故障选线研究. 北京: 邮电大学学报, 2006, S2: 79—82.
- [160] R Hecht-Neilsen. Kolmogorov mapping neural network existence theorem. Proceeding of IEEE First International Conference on Neural Networks, 1987: 11—13.
- [161] B Irie, S Miyake. Capabilities of three-layered perceptrons. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1988: 641—648.
- [162] K I Funahashi. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. Neural Networks, 1989, 2: 183—192.
- [163] K Hornick, M Stinchcombe, H White. Multilayer feedforward networks are universal approximators. Neural Networks, 1989, 2: 359—366.
- [164] D A Vaccari and E Wojciechowski. Neural networks as function approximators: Teaching a neural network to multiply. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks: IEEE World Congress Computational Intelligence, 1994: 2217—2222.
- [165] D Tien, P Nobar. Dificiency in the current trend of training of neural network systems, suggestions and solutions. Proceedings of IEEE Region 10 International Conference on Electrical and Electronic Technology, 2001, 1: 43—49.



- [166] H F Leung, H K Lam, S H Ling, K S Tam. Tuning of the structure and parameters of a neural network using an improved genetic algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2003, 14(1): 79—88.
- [167] S Ferrari, M Maggioni, N A Borghese. Multiscale approximation with hierarchical radial basis functions networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2004, 15(1): 178—188.
- [168] P Y Liu, H X Li. Efficient learning algorithms for three-layer regular feedforward fuzzy neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2004, 15(3): 545—558.
- [169] S Ferrari, R F Stengel. Smooth function approximation using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16(1): 24—38.
- [170] G B Huang, P Saratchandran, N Sundararajan. A generalized growing and pruning RBF (GGAP—RBF) neural network for function approximation. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16(1): 57—67.
- [171] 周志华, 曹存根. 神经网络及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [172] 吴简彤, 王建华. 神经网络技术及其应用. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1996.
- [173] 李学桥, 马莉. 神经网络·工程应用. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.
- [174] 孙增圻. 智能控制理论与技术. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [175] 姚一波, 王纪亮. 提高 BP 网络训练速度的研究. *信息技术*, 2002, (1): 4—6.
- [176] 林丽兰, 何勇. 改进的 BP 神经网络方法及其在农业商品总产值预测中的应用. *科技通报*, 2005, 21(1): 6—9.
- [177] Pawan Lingras. Rough neural networks. *Information Sciences*, 1998, 110: 207—215.



- [178] 庞清乐, 孙同景, 杨福刚, 等. 基于粗糙集理论的归一化方法. 计算机工程, 2007, 33(8): 36—38.
- [179] 季涛. 基于暂态行波的配电线路故障测度研究. 济南: 山东大学, 2006.
- [180] ATPDRAW version 3 user manual. TR A4389, EFI, Norway, 1996.
- [181] ATP—EMTP Rule Book. Canadian—American EMTP Users Group, Portland, 1997.
- [182] 钱鑫, 李虎, 施围. 电力系统仿真计算软件介绍. 继电器, 2001, 30(1): 43—46.
- [183] 程刚, 张沛超. 基于 MATLAB 和 ATP 的微机距离保护动态仿真. 继电器, 2006, 34(22): 5—8.
- [184] 庞清乐, 孙同景, 钟麦英. 基于小波包分析的配电网故障选线新方法. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 19—22.
- [185] 庞清乐, 孙同景, 钟麦英. 基于粗糙集理论的配电网故障选线装置研究. 高电压技术, 2007, 33(3): 37—41.
- [186] 56F8346/56F8146 Data Sheet. Freescale Inc, 2004.
- [187] 56F8300 Peripheral User Manual. Freescale Inc, 2004.
- [188] 黄智伟, 王彦. FPGA 系统设计与实践. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [189] 刘韬, 楼兴华. FPGA 数据系统设计与开发实例导航. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [190] Uwe Meyer-Baese. Digital Signal Processing with Programmable Gate Arrays. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [191] 庞清乐. 基于智能算法的小电流接地故障选线研究. 济南: 山东大学, 2007.
- [192] 孙波. 基于暂态信息的配电网单相接地故障定位技术研究. 济南: 山东大学, 2009.
- [193] 张利. 中性点非有效接地系统单相接地故障定位方法的研究.



- 北京: 华北电力大学, 2009.
- [194] 孙波, 孙同景, 薛永端, 徐丙垠, 等. 基于暂态信息的小电流接地故障区段定位. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 52—55.
- [195] 孙波, 孙同景, 徐丙垠, 薛永端, 等. 架空线路小电流接地故障 0 模电压信号获取新方法. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 58—61.
- [196] 孙波, 孙同景, 薛永端, 徐丙垠, 等. 利用空间电磁场感应检测小电流接地故障. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 43—47.
- [197] 孙波, 薛永端, 孙同景, 徐丙垠, 等. 架空线路小电流接地故障电流信息获取新方法. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 74—77.
- [198] 孙波, 薛永端, 孙同景, 徐丙垠, 等. 基于暂态场量的小电流接地故障定位新方法. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 71—75.
- [199] 孙波, 徐丙垠, 孙同景, 薛永端, 等. 基于暂态 0 模电流近似熵的小电流接地故障定位新方法. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 83—86.
- [200] 费军, 单渊达. 配网中自动故障定位系统的研究. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 32—34.
- [201] 桑在中, 潘贞存, 李磊, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线测距和定位的新技术. 电网技术, 1997, 21(10): 50—52.
- [202] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64—66.
- [203] 唐述宏, 季涛. 基于 GPRS 技术的配电线路故障自动定位系统. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 59—62.
- [204] 张利, 杨以涵, 杨秀媛. 配电网离线故障定位方法研究与实现. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 70—74.
- [205] 杨鹏, 杨以涵, 司冬梅, 等. 配电网单相接地故障定位技术. 实验研究电力系统自动化, 2008, 32(9): 104—107.



- [206] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [207] 季涛, 孙同景, 徐丙垠, 等. 配电混合线路双端行波故障测距技术. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 89—94.
- [208] 陈平. 输电线路现代行波故障测距及其应用研究. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [209] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 利用 GPS 的输电线路行波故障测距研究. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 37—40.
- [210] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用. 电力系统自动化, 2001(23): 62—65.
- [211] 张利, 杨以涵, 司冬梅, 等. 基于零序电流和磁场检测故障杆的配电网故障定位. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 73—76.
- [212] 张利, 杨以涵, 杨秀媛, 等. 移动式比相法配电网接地故障定位研究. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 91—97.
- [213] 张利, 杨鹏, 司冬梅, 等. 基于零序功率方向的中性点不接地系统在线故障定位. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 79—82.
- [214] 李孟秋, 王耀南, 王辉, 等. 小电流接地系统单相接地故障点探测方法的研究. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 6—9.
- [215] 马士聪, 徐丙垠, 高厚磊, 等. 检测暂态 0 模电流相关性的小电流接地故障定位方法. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 48—51.
- [216] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁. 基于 Hilbert 变换的非正弦电路无功及瞬时无功功率定义. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 35—39.
- [217] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51—56.
- [218] 徐丙垠. 配电自动化远方终端技术. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 41—44.
- [219] 任建文, 孙文武, 周明, 等. 基于数学形态学的配电网单相接地故障暂态选线算法. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 70—74.



- [220] 肖霞, 业妙元, 陈金玲, 等. 光学电压互感器的设计与实验. 电网技术, 2003, 27(6): 45—47.
- [221] 贾清泉, 杨以涵, 宋家骅. 光学电流传感器用于配电网单相接地故障电流检测. 电力系统自动化, 2001, 25(11): 41—44.
- [222] 江渝, 冉立, 刘和平, 等. 可调节消弧线圈接地系统单相接地故障的辨识和选线. 电工技术学报, 2007, 22(8): 101—107.
- [223] 张帆, 潘贞存, 张慧芬, 等. 基于零序电流暂态极大值的小电流接地选线新判据. 电力系统自动化. 2006, 30(4): 45—48.
- [224] Jun Zhu, Lubkeman D L, Girgis A A. Automated Fault Location and Diagnosis on Electric Power Distribution Feeders. IEEE Transactions on power delivery, 1997, 12(2): 801—809.
- [225] Wiktor Charytoniuk, Wei-Jen Lee, Mo-Shing Chen, et al. Arcing Fault Detection in Underground Distribution Networks-Feasibility Study. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 2000, 36(6): 1756—1761.
- [226] 张庆超, 姚斌, 杨金飞, 等. 基于 RS 维数的小电流接地系统故障选线和定位. 电工技术学报, 2007, 22(12): 164—169.
- [227] 何奔腾, 金华烽, 李菊. 能量方向保护原理和特性研究. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 166—170.
- [228] 王政, 吴杰. 配合 FTU 的小电流系统单相接地故障定位方法. 电力自动化设备. 2003, 23(2): 21—26.
- [229] Ranjbar A M, Shirani A R, Fathi A F. A new approach for fault location problem on power lines. IEEE Trans. On Power Delivery, 1992, 7(1): 146—151.
- [230] 潘露, 吕艳萍, 于芳, 等. 基于相频特性与多频带分析的小电流接地系统故障选线. 电力系统自动化. 2007, 31(4): 76—84.
- [231] Saha A K, Chowdhury S P, Chowdhury S and et al. Microturbine based distributed generator in smart grid application. 20th



- International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 8-11 June 2009, Prague, Czech Republic, pp:1—6.
- [232] Wang J, Huang A, Woongje Sung and et al. Smart grid technologies. IEEE on Industrial Electronics Magazine, 2009, vol.3, no.2, pp:16—23.
- [233] Zhang X P. A framework for operation and control of smart grids with distributed generation. IEEE on Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 20-24 July 2008, pp:1—5.
- [234] McDaniel P, McLaughlin S. Security and Privacy Challenges in the Smart Grid. IEEE on Security & Privacy, 2009, vol.7, no.3, pp:75—77.
- [235] Pipattanasomporn M, Feroze H, Rahman S. Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation. IEEE on Power Systems Conference and Exposition, 15-18 March 2009, pp: 1—8.
- [236] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述. 电网技术, 2009, 33(8): 1—7.
- [237] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7—11.
- [238] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网. 中国电力, 2008, 41(6): 19—22.
- [239] 徐丙垠. 智能配电网中的配电自动化技术. 第一届智能电网研究学术会议论坛, 2009, 101—123.
- [240] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网. 第一届智能电网研究学术会议论坛, 2009, 379—386.
- [241] 帅军庆. 创新发展建设智能电网: 华东高级调度中心项目群建设的实践. 中国电力企业管理, 2009(4): 19—21.
- [242] 李岚峰. 华北公司智能电网建设取得新成果[Z/OL]. 2009—03—07. <http://www.indaa.com.cn>.



- [243] 刘文博, 张伯明, 吴文传, 等. 在线静态电压稳定预警与预防控制系统. 电网技术, 2008, 32(17): 6—11.
- [244] 宋新立, 汤涌, 卜广全, 等. 大电网安全分析的全过程动态仿真技术. 电网技术, 2008, 32(22): 23—28.
- [245] 严凤, 杨奇逊, 齐郑, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 37—43.
- [246] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法. 电工技术学报, 2008, 23(11): 139—145, 165.
- [247] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 一种混合智能算法在配电网重构中的应用. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 73—78.
- [248] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35—41.
- [249] 王超学, 崔杜武, 崔颖安, 等. 使用基于中医思想的蚁群算法求解配电网重构. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 13—18.
- [250] 蒙文川, 邱家驹. 基于免疫算法的配电网重构. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 25—29.
- [251] 魏巍, 李兴源, 廖萍, 等. 含分布式电源的电力系统多代理故障恢复新方法. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 89—93.
- [252] 熊小伏, 陈星田, 夏莹, 等. 面向智能电网的继电保护系统重构. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 33—37.
- [253] 李斌, 薄志谦. 面向智能电网的保护控制系统. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 7—12.
- [254] 何耀华, 韩守水, 程尚模. 基于多神经网络协同推理的故障诊断系统的研制. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 57—60, 65.
- [255] 吴欣, 郭创新, 曹一家. 基于贝叶斯网络及信息时序属性的电力系统故障诊断方法. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 14—18.
- [256] Lee H J, Park D Y, Ahn B S, et al. A fuzzy expert system for the integrated fault diagnosis. IEEE Trans. On Power Delivery, 2000, 15(2): 833—838.



- [257] 束红春, 孙向飞, 司大军, 等. 基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78—82.
- [258] 赵伟, 白晓民, 丁剑, 等. 基于协同式专家系统及多智能体技术的电网故障诊断方法. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 1—8.
- [259] 周子冠, 白晓民, 李文锋, 等. 基于广域测量系统的电网故障在线智能化诊断与分析方法. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 1—7.
- [260] 王丽华, 江涛, 盛晓红, 等. 基于 IEC 61850 标准的保护功能建模分析. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 55—59.
- [261] 唐成虹, 宋斌, 胡国, 等. 基于 IEC 61850 标准的新型变电站防误系统. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 96—99.
- [262] 童晓阳, 李映川, 章力, 等. 基于 IEC 61850 的保护功能交互模型. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 41—45.
- [263] 朱永利, 王德文, 邸剑, 等. 遵循 IEC 61850 的新型网络化电力远动系统. 华北电力大学学报, 2008, 35(6): 57—61.
- [264] 徐晓慧. 智能电网导论. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [265] 何光宇, 孙英云. 智能电网基础. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [266] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [267] 高翔. 电网故障信息系统. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [268] 高翔. 数字化变电站应用技术. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [269] 高翔. 继电保护状态检修应用技术. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [270] 束洪春. 配电网故障选线. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [271] 季涛. 中性点非有效接地系统行波故障测距技术. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.